

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SU DAMLASI YOĞUNLAŞMASINI
HIZLANDIRACAK POLİMERİK
YÜZEYLERİN SENTEZİ VE
KARAKTERİZASYONU

İKRİME ORKAN UÇAR
DOKTORA TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE
2012

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SU DAMLASI YOĞUNLAŞMASINI
HIZLANDIRACAK POLİMERİK
YÜZEYLERİN SENTEZİ VE
KARAKTERİZASYONU

İKRİME ORKAN UÇAR

DOKTORA TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. H.Yıldırım ERBİL

GEBZE

2012



DOKTORA TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 19.06.2012.....tarih ve 2012/..22 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 20/06/2012 tarihinde tez savunma sınavı yapılan İkrime ORKAN UÇAR'ın tez çalışması Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. H. Yıldırım ERBİL

ÜYE

: Prof. Dr. Mahmut BAYRAMOĞLU

ÜYE

: Prof. Dr. Veli DENİZ (KOU)

ÜYE

: Prof. Dr. Murat ÖZDEMİR

ÜYE

: Doç. Dr. Hayal BÜLBÜL SÖNMEZ

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../20... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZ BAŞLIĞI: SU DAMLASI YOĞUNLAŞMASINI HIZLANDIRACAK POLİMERİK YÜZEYLERİN SENTEZİ VE KARAKTERİZASYONU

YAZAR ADI: İKRİME ORKAN UÇAR

Polimer yüzeyler üzerinde meydana gelen damla tipi kondensasyon, hem ısı transferi esnasında sağladığı yüksek verimlilikten hem de atmosferde mevcut nemden su üretme çalışmalarında alternatif metot olarak büyük ilgi toplamaktadır. Tez çalışmasının amacı atmosferik ortamda çiğlenme noktasının hemen altındaki sıcaklıkta su damlası yoğunlaşmasını hızlandıracak polimerik yüzeylerin sentezi, karakterize edilmesi ve bu koşullarda yüzey özelliklerinin damla kondensasyonu hızına olan etkisinin incelenmesidir.

Bu kapsamda, atmosferik ortamda, çiğlenme sıcaklığının hemen altında yapılan denemelerde, poliolefin polimer yüzeylerin pürüzlülüğündeki artışın başlangıç temas açısı ve temas açısı karmaşasını arttırdığı tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak bu yüzeyler üzerinde kondense olan su damlalarının çekirdeklenme esnasındaki birim alan başına düşen sayılarının da arttığı saptanmıştır. Diğer taraftan, bu damlaların su buharının difüzyonuyla büyüdüğü aşamalarda, yüzey pürüzlülüğündeki artışın, damlacıkların toplam hacmi (su damlacıklarının büyüme hızını) ve yüzey kaplama oranını arttırdığı saptanmıştır. Ayrıca bu polimer yüzeyler üzerinde diğer damlalardan izole olarak büyüyen damlaların çapının, literatürde daha önce rapor edildiği şekilde zamanın 1/3'cü kuvvetiyle büyüdükleri doğrulanmıştır.

Öte yandan, difüzyon kontrollü damla buharlaşması için türetilen denklemlerin, polimer yüzeyler üzerinde çiğlenme koşullarında tek bir damlacığın yoğunlaşma hızı için başarılı bir şekilde kullanılabildiği ilk kez gösterilmiştir. Tek bir izole damlanın yoğunlaşma hızının polimer yüzeylerin pürüzlülüğü, başlangıç temas açısı ve temas açısı karmaşasının artışı ile azaldığı tespit edilmiştir. Etrafı diğer damlalar tarafından çevrilmiş tek bir damlanın büyüme hızının ise, diğer damlalardan izole olarak büyüyen tek bir damlanın büyüme hızından %14-40 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni komşu damlaların yatay buhar difüzyonunu engellemesidir.

SUMMARY

TITLE OF THE THESIS: SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF POLYMERIC SURFACES TO ENHANCE WATER DROP CONDENSATION

AUTHOR: İKRİME ORKAN UÇAR

Dropwise condensation which occurs on polymer surfaces has been aroused great interest for both its high efficiency for the heat transfer process and also introducing an alternative method for harvesting water directly from the humidity present in the atmosphere. The aim of this thesis is the synthesis and characterization of polymeric surfaces to enhance water drop condensation in atmospheric conditions at a temperature just below the dew point and also investigation of the effect of surface properties on dropwise condensation rate.

Within this scope, in ambient conditions at a temperature just below the dew point, it was determined that an increase in surface roughness and corresponding initial contact angle and contact angle hysteresis of polyolefin polymer surfaces results an increase in initial number of the condensed droplets per unit area during nucleation stage. In addition, the total volume of condensed water (growth rate of water droplets) and surface coverage for the growth stage by diffusion increased with surface roughness. Moreover, it was confirmed that drop radius of condensed isolated droplets on these polymer surfaces grow according to a power law with exponent (1/3) of time similar to the literature reports.

On the other hand, it was found for the first time that the diffusion based drop evaporation equations can be used successfully to estimate the rate of drop growth of a single droplet which condensed on a polymer surface just below the dew point temperature. It was determined that the condensation rate of a single isolated droplet decreased with the increase of surface roughness and corresponding initial contact angle and contact angle hysteresis. Growth rate of a single droplet which was surrounded by other droplets was found %14-40 lower than that of a single isolated droplet because of barrier effect to lateral vapor diffusion.

TEŞEKKÜR

Eğitim ve öğretim hayatıma dair attığım büyük adımlarda her zaman yanımda olan, yol gösteren, bilgi ve tecrübelerini hiçbir zaman esirgemeyen, çalışma azmi ve başarısıyla önüme ışık tutan, sağlamış olduğu imkanlarla çalışmalarımı kolaylaştıran, beni yetiştiren ve üzerimde en az ailem kadar hakkı büyük sayın hocam Prof. Dr. H. Yıldırım ERBİL'e,

Hayatımın her döneminde maddi, manevi her türlü desteklerini ve sevgilerini benden esirgemeyen, zor zamanlarımda yanımda olan, yalnız olmadığımı hissettiren fedakar annem Fatma ORKAN, canım babam Yüksel ORKAN, ve biricik kardeşim Betül ORKAN'a,

Bilgilerini benimle paylaşan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen arkadaşlarım Arş. Gör. Merve DANDAN DOĞANCI, Arş. Gör. Uğur CENGİZ ve Dr. C. Elif ÖZEN CANSOY'a,

Çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Meltem KASAPOĞLU, Arş. Gör. İbrahim KORKUT, Arş. Gör. Ebubekir Sıddık AYDIN, Nevin ATALAY GENGEÇ ve Salih ÖZBAY'a,

Sevgisini ve desteğini yanımda hissettiğim ismini yazamadığım tüm dostlarıma, arkadaşlarıma, tüm sevdiklerime,

Lisansüstü eğitimim süresince bana karşı anlayış ve sabır gösteren, her daim desteğim ve iyi ki varsın dediğim sevgili eşim Yrd. Doç. Dr. Mehmet UÇAR'a ithaf olunur.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xix
1. GİRİŞ	1
2. YÜZEY GERİLİMİ ve TEMAS AÇISI	4
2.1. Yüzey Gerilimi (Serbest Yüzey Enerjisi)	4
2.2. Temas Açısı	6
2.2.1. Temas Açısı Ölçüm Metotları	8
2.2.1.1. Statik Temas Açısı Ölçümü (Gonyometrik Metot)	8
2.2.1.2. Dinamik Temas Açısı Ölçümü (Tensiyometrik Metot)	13
2.2.2. Temas Açısı Karmaşası (Contact Angle Hysteresis)	14
2.2.3. Polimerlerin Serbest Yüzey Enerjisinin Belirlenmesi	15
2.2.3.1. van Oss Good (Asit-Baz) Metodu	17
2.2.4. Süperhidrofobik Yüzeyler	19
2.2.4.1. Doğal Süperhidrofobik Yüzeyler: Nilüfer (Lotus) Etkisi	20
2.2.4.2. Yapay Süperhidrofobik Yüzeyler	21
2.2.5. Pürüzlülüğün Temas Açısına Etkisi	22
2.2.5.1. Wenzel Teorisi	23
2.2.5.2. Cassie Baxter Teorisi	24
3. NEMLİ HAVA ve ÖZELLİKLERİ	26
3.1. Sıvıların Buhar Basıncı	27
3.2. Bağlı Nem ve Mutlak Nem	28
3.3. Çiğ (Şebnem) Noktası Sıcaklığı ve Bağlı Nem İlişkisi	30
3.3.1. Çiğlenme Noktasının Psikrometrik Diagram ile Belirlenmesi	32

3.4. Hava Nemini Ölçmede Kullanılan Metotlar	33
3.4.1. Kuru-Yaş Termometre Metodu (Psikrometre)	34
3.4.2. Çiğ Noktası Higrometresi	35
3.4.3. Saçlı Higrometre	36
3.4.4. Elektriksel Direnç Higrometre	36
3.5. Bağlı Nemin Sabitlenmesi	37
4. YOĞUNLAŞMA	39
4.1. Yoğunlaşma (Kondensasyon) ve Çeşitleri	39
4.1.1. Film Tipi Yoğunlaşma	40
4.1.2. Damla Tipi Yoğunlaşma	41
4.1.2.1. Damla Tipi Yoğunlaşmanın Mekanizması	43
4.1.2.2. Damla Büyüklüğü Dağılımı	45
4.1.2.3. Damla Yoğunlaşmasında Isı Transferi	47
4.2. Yüzeylere Kondensasyon	52
4.2.1. Kondensasyon ile Yüzeyde Damlacık Oluşumu ve Yüzey Kaplama Oranı	54
4.2.2. Damla Kondensasyonu ile Su Toplanması	57
4.2.3. Polimer Olmayan Yüzeylerde Damla Yoğunlaşmasının Arttırılması	60
4.2.4. Polimer Yüzeylerde Damla Yoğunlaşmasına Polimer Cinsinin Etkisi	62
4.2.4.1. Damla Kondensasyonuna Serbest Yüzey Enerjisinin Etkisi	64
4.2.4.2. Damla Kondensasyonuna Temas Açısı Karmaşasının Etkisi	66
4.2.4.3. Damla Kondensasyonunda Süperhidrofobik Yüzey Kullanımı	70
5. DİFÜZYON	73
5.1. Difüzyon ve Sıvı Yoğunlaşması	73
5.2. Fick Difüzyon Kanunları	74
5.2.1. Fick'in 1. Difüzyon Kanunu	74
5.2.2. Fick'in 2. Difüzyon Kanunu	75
5.3. Difüzyon Dinamik Denge Hali (Steady State)	75

5.4. Difüzyon Denklemlerinin Damla Buharlaşmasında Kullanılması	76
5.5. Difüzyon Denklemlerinin Damla Yoğunlaşmasında Kullanılması	81
5.6. Merkez Damla Etrafındaki Komşu Damlaların Kondensasyon Hızına Etkisi	84
6. MATERYAL METOT	85
6.1. Polimerik Yüzeylerin Hazırlanması	85
6.2. Polimerik Yüzeylerin 2D Optik Mikroskop ve 3D Yüzey Profilometresi Kullanılarak Görüntülenmesi	87
6.3. Polimerik Yüzeyler Üzerinde Su Damlası Temas Açısı Ölçümleri	88
6.4. Polimerik Yüzeylerin Serbest Yüzey Enerjilerinin Belirlenmesi	89
6.5. Su Damlası Yoğunlaşmasının Mikroskop Altında İncelenmesi	89
6.5.1. Kondense Olmuş Su Damlalarının Görüntü İşleme ve Analiz Programları (UTHSCSA Image Tool ve Image J) Kullanılarak İşlenmesi	91
6.6. Su Toplama Denemeleri	92
6.6.1. Bakır Hücre Kullanılarak Yapılan Su Toplama Denemeleri	92
6.6.2. Peltier Elemanı Kullanılarak Yapılan Su Toplama Denemeleri	96
7. BULGULAR	99
7.1. Sabit %63 Bağıl Nemde Çiğlenme Sıcaklığının Hemen Altındaki Yüzey Üzerinde Damlacık Kondensasyonunun İncelenmesi	99
7.1.1. Polimer Yüzeylerin Karakterizasyonu	99
7.1.2. Çiğlenme Sıcaklığının Hemen Altında Meydana Gelen Damlacık Kondensasyonunun Yüzey Özellikleri ile İlişkilendirilmesi	107
7.1.3. Birim Alan Başına Kondense Olan Damlacık Sayısı ile Yüzey Özelliklerinin İlişkilendirilmesi	119
7.1.4. Damlacıkların Toplam Yüzey Alanı ve Toplam Hacim Artışı	127
7.2. Sabit %35-47 Bağıl Nemde Çiğlenme Sıcaklığının Altındaki Yüzey Üzerindeki Damlacık Kondensasyonunun İncelenmesi ve Yüzey Özellikleri ile İlişkilendirilmesi	130
7.3. Sabit %63 Bağıl Nemde Çiğlenme Sıcaklığındaki Tek Bir Damlacığın Büyümesinin İncelenmesi	148
7.3.1. İzole ve Etrafı Damlacıklarla Sarılı Damlaların Analizi	148

7.3.2. Difüzyon Denklemlerinin Damlacık Yoğunlaşmasında Kullanılması	156
7.3.3. İzole Damlaların Büyüme Hızlarının Yüzey Özellikleri ile İlişkilendirilmesi	160
7.3.4. Etrafı Saran Komşu Damlaların Büyüme Hızına Etkisi	162
7.4. Aynı Polimerin (PPPE) Üzerinde Damla Kondensasyon Hızına Alttaki Isı Transfer Katsayıları Birbirinden Farklı Katıların Etkisi	164
7.5. Metal ve Polimer Yüzeyler Üzerinde Su Toplama Denemeleri	173
7.5.1. Bakır Hücre Kullanılarak Yapılan Su Toplama Denemelerinin Sonuçları	173
7.5.2. Peltier Elemanı Kullanılarak Yapılan Su Toplama Denemelerinin Sonuçları	181
7.5.2.1. Peltier Elemanı Kullanılarak Farklı Yüzeyler Üzerinde Yapılan Su Toplama Denemelerinin Sonuçları	181
7.5.2.2. Peltier Elemanı Kullanılarak Bakır, Cam ve PP Üzerine Kaplanmış Tek Polimer (PPPE) Yüzeyler Üzerinde Yapılan Su Toplama Denemelerinin Sonuçları	183
7.5.2.3. Peltier Elemanı Kullanılarak Cam ve Bakır Üzerine Kaplanmış Farklı Temas Açısına Sahip Tek Polimer (PP) Yüzeyler Üzerinde Yapılan Su Toplama Denemelerinin Sonuçları	184
7.5.2.4. Peltier Elemanı Kullanılarak Cam Üzerine Kaplanmış Farklı Polimer Yüzeyler Üzerinde Yapılan Su Toplama Denemelerinin Sonuçları	184
8. TARTIŞMALAR	188
8.1. Yüzey Pürüzlülüğünün ve Temas Açısı Karmaşasının Polimer Yüzeylerde Meydana Gelen Damla Kondensasyonunun Hızına Etkisi	188
8.2. Polimer Yüzeylerde İzole Tek Bir Damlacığın Yarıçapının Büyümesi ile Zaman Arasındaki Üstel İlişki	190

8.3. Difüzyonla Damla Buharlaşmasında Kullanılan Denklemlerin, Çiğlenme Sıcaklığının Hemen Altında, Tek Bir Damlacığın Yoğunlaşma Hızı için Kullanılması	191
8.4. Komşu Damlaların Varlığının Tek Bir Damlacığın Kondensasyon Hızını Azaltması	192
8.5. Damla Kondensasyonuna Alttaki Malzemenin Isı Transfer Katsayısının Etkisi	193
9. SONUÇLAR	195
KAYNAKLAR	197
ÖZGEÇMİŞ	204

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

γ	: Ara yüzey gerilimi
γ_{SL}	: Katı-sıvı ara yüzey gerilimi
γ_{SV}	: Katı-buhar ara yüzey gerilimi
γ_{LV}	: Sıvı-buhar ara yüzey gerilimi
θ	: Temas açısı
θ_e	: Denge temas açısı
θ_a	: İlerleyen temas açısı
θ_r	: Gerileyen temas açısı
ϕ	: Kayma açısı
CAH	: Temas açısı karmaşası
WH	: Islatılabilirliğin karmaşası
R_{rms}	: Ortalama karekök yüzey pürüzlülüğü
R_a	: Aritmetik ortalama yüzey pürüzlülüğü
R_t	: Maksimum profil yüksekliği
R_p	: Maksimum pik yüksekliği
R_v	: Maksimum vadi derinliği
A_{LS}	: Sıvı-katı ara yüzeyindeki alan
A_{LV}	: Sıvı-hava ara yüzeyindeki alan
V	: Hacim
N	: Birim alan başına kondense olan damla sayısı
RH	: Bağıl nem
$T_{dış}$	: Ortam sıcaklığı
$T_{yüzey}$	: Yüzey üzerindeki sıcaklık
$T_{çığ}$	: Çiğlenme sıcaklığı
ΔT	: Ortam sıcaklığı ile yüzey sıcaklığı arasındaki fark
$\Delta T_{çığ}$	: Yüzey sıcaklığı ile çiğlenme sıcaklığı arasındaki fark
k	: Isı transfer katsayısı

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Sıvı içindeki ve sıvı yüzeyindeki moleküllerin birbirleri ile olan etkileşimi.	5
2.2. Katı yüzeyi ile üzerindeki su damlasının arasındaki temas açısının şematik gösterimi.	6
2.3. Su damlası ile vermiş olduğu açıya göre karakterize edilen yüzey çeşitleri.	8
2.4. Gonyometrik metot kullanılarak kaydedilmiş damla profilinin işlenmesi ve temas açısı ölçüm penceresi.	9
2.5. İlerleme ve gerileme temas açılarının ölçümü.	12
2.6. Kayma açısının şematik gösterimi.	13
2.7. a) Lotus yaprağının SEM görüntüsü (Bar: 20 μ m) [Barthhlott and Neinhuis, 1997]. b) Lotus yaprağı yüzeyinin bilgisayar grafiği.	21
2.8. Basit bir plastik olan polipropilenin pürüzlendirilmesi ile süperhidrofobik yüzey sentezi. a) i-PP yüzey üzerinde oluşturulmuş su damlası profili (temas açısı $104^\circ \pm 2^\circ$). b) Pürüzlü i-PP yüzeyde oluşturulmuş su damlası profili (temas açısı 160°). c) Pürüzlülük kazandırılmış i-PP yüzeyin AFM görüntüsü [Erbil et al., 2003].	22
2.9. Wenzel modeline göre pürüzlü bir yüzey üzerindeki sıvı damlası.	23
2.10. Cassie-Baxter modeline göre pürüzlü bir yüzeydeki sıvı damlası.	25
3.1. Çiğlenmenin meydana geldiği yüzeylere örnekler.	30
3.2. Çiğlenme sıcaklığının şematik olarak gösterimi.	31
3.3. Psikrometrik diagram ve çiğlenme sıcaklığının psikrometrik diyagram yardımı ile bulunuşu.	33
3.4. Kuru- yaş hazneli psikrometri.	34
3.5. Saçlı higrometre.	36
4.1. Kondensasyon olayının sınıflandırılması [Hartnett and Irvine, 1991].	40
4.2. Yatay bir tüp üzerinde meydana gelen film tipi kondensasyon [Vemuri, 2005].	41

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.3. Yatay bir tüp üzerinde meydana gelen damla tipi kondensasyon [Vemuri, 2005].	41
4.4. Damla kondensasyonunun mekanizması [Leach et al., 2006].	43
4.5. Kondensasyon prosesinin şematik gösterimi.	44
4.6. Polietilen yüzeyi kaplayan damlalar [Briscoe et al., 2005].	56
4.7. Çöl böceği (Stenecora) ve literatürdeki su toplama çalışmaları [Beysens, 2006].	59
5.1. Katı yüzey üzerinde buharlaşan sıvı damlasının buharlaşma modelleri, [Li, 2009].	77
5.2. Küresel damlaya ait parametreler.	77
6.1. (a) İnce film kaplamak için kullanılan deney düzeneği ve (b) mekanik dipper.	86
6.2. NICON ECLIPSE LV 100 2D optik mikroskobu ve 3D yüzey profilometresi.	87
6.3. KSV CAM 200 temas açısı ölçüm cihazı.	88
6.4. Çiğ noktası hesaplama programı.	90
6.5. NIKON ECLIPSE LV 150 L metal mikroskobu.	91
6.6. Çekilen fotoğrafların UTHSCSA görüntü işleme ve analiz programı tarafından işlenmesi.	91
6.7. Orjinal resim (sağdaki), siyah/beyaz (işlenmiş) resim (soldaki).	92
6.8. Bakır hücreyle su toplama denemelerinin gerçekleştirildiği deney düzeneğinin fotoğrafı.	93
6.9. Bakır hücrenin sırasıyla yandan, önden, üstten ve katı model görüntüsü.	94
6.10. Denemelerde kullanılan termohigrometre ve termometreler.	95
6.11. Peltier elemanı ve Peltier elemanını meydana getiren bileşenler.	97
6.12. Kondensasyonla polistiren petride toplanan suyu belirlemek için Peltier elemanı ile kurulan sistem (soldaki) ve bakır üzerine kaplanmış PPPE polimer yüzeyi üzerinden su toplanması (sağdaki).	98
7.1. Polimer yüzeylerin 500x büyültmede çekilen 2D optik mikroskop görüntüleri.	100

<u>Sekil</u>		<u>Sayfa</u>
7.2.	Polimer yüzeylerin 500x büyültmede çekilen 3D yüzey profilleri.	101
7.3.	(a) PP, (b) HDPE, (c) PPPE, (d) LDPE ve (e) EVA polimer yüzeylerindeki pik yüksekliklerinin pik sayıları ile değişimi.	105
7.4.	PP yüzeyde %63 bağıl nemde kondense olmuş damlalar.	109
7.5.	HDPE yüzeyde %63 bağıl nemde kondense olmuş damlalar.	110
7.6.	PPPE yüzeyde %63 bağıl nemde kondense olmuş damlalar.	111
7.7.	LDPE yüzeyde %63 bağıl nemde kondense olmuş damlalar.	112
7.8.	EVA yüzeyde %63 bağıl nemde kondense olmuş damlalar.	113
7.9.	%63 bağıl nemde, polimer yüzeylerde meydana gelen yüzey kaplama oranının zamanla değişimi.	115
7.10.	%63 bağıl nemde, polimer yüzeylerde 720. s'de meydana gelen yüzey kaplama oranının (a) su temas açısı (θ_e), (b) temas açısı karmaşası (CAH), (c) ıslatılabilirliğin karmaşası (WH), (d) yüzey pürüzlülüğü (R_{rms}), (e) serbest yüzey enerjisi (γ^{total}) ile ilişkisi.	118
7.11.	%63 bağıl nemde, polimer yüzeylerde başlangıç anında birim alan başına kondense olan damla sayısının (N_o) polimer yüzeylerin pürüzlülüğü (R_{rms}) ile değişimi.	121
7.12.	%63 bağıl nemde, polimer yüzeylerde damla kondensasyonu ile meydana gelen damlaların ortalama damla temas çapının zamanla değişimi.	122
7.13.	%63 bağıl nemde, (a) HDPE, LDPE ve EVA, (b) PPPE yüzeyler için $(\alpha_e - \alpha)/(\alpha_e - \alpha_o)$ oranının (N/N_o) oranı ile değişimi.	124
7.14.	%63 bağıl nemde, HDPE, PPPE ve LDPE yüzeylerde kondense olan damlaların ortalama damla çapının logaritmasının zamanın logaritması ile değişimi.	126
7.15.	%63 bağıl nemde, polimer yüzeylere kondense olan damlaların hacminin zamana bağlı artışı.	128
7.16.	%63 bağıl nemde, polimer yüzeylere kondense olan damlaların sıvı-katı ara yüzeyindeki toplam alanlarının zamanla değişimi.	129
7.17.	%63 bağıl nemde, polimer yüzeylere kondense olan damlaların sıvı-hava ara yüzeyindeki toplam alanlarının zamanla değişimi.	129

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.18. %35-36 bağıl nemde, polimer yüzeylerde kondense olan damlaların 100x büyültmede çekilmiş optik mikroskop görüntüleri.	131
7.19. %35-36 bağıl nemde, polimer yüzeylerde meydana gelen yüzey kaplama oranının zamanla değişimi.	132
7.20. %35-36 bağıl nemde, polimer yüzeylerde 720. s'de meydana gelen yüzey kaplama oranının (a) su temas açısı (θ_e), (b) temas açısı karmaşası (CAH), (c) yüzey pürüzlülüğü (R_{rms}), (d) serbest yüzey enerjisi (γ^{total}) ile ilişkisi.	134
7.21. %38 bağıl nemde, polimer yüzeylerde kondense olan damlaların 100x büyültmede çekilmiş optik mikroskop görüntüleri.	135
7.22. %38 bağıl nemde, polimer yüzeylerde meydana gelen yüzey kaplama oranının zamanla değişimi.	136
7.23. %38 bağıl nemde, polimer yüzeylerde 720. s'de meydana gelen yüzey kaplama oranının (a) su temas açısı (θ_e), (b) temas açısı karmaşası (CAH), (c) yüzey pürüzlülüğü (R_{rms}), (d) serbest yüzey enerjisi (γ^{total}) ile ilişkisi.	138
7.24. %43 bağıl nemde, polimer yüzeylerde kondense olan damlaların 100x büyültmede çekilmiş optik mikroskop görüntüleri.	139
7.25. %43 bağıl nemde, polimer yüzeylerde meydana gelen yüzey kaplama oranının zamanla değişimi.	140
7.26. %43 bağıl nemde, polimer yüzeylerde 720. s'de meydana gelen yüzey kaplama oranının (a) su temas açısı (θ_e), (b) temas açısı karmaşası (CAH), (c) yüzey pürüzlülüğü (R_{rms}), (d) serbest yüzey enerjisi (γ^{total}) ile ilişkisi.	142
7.27. %46-47 bağıl nemde, polimer yüzeylerde kondense olan damlaların 100x büyültmede çekilmiş optik mikroskop görüntüleri.	143
7.28. %46-47 bağıl nemde, polimer yüzeylerde meydana gelen yüzey kaplama oranının zamanla değişimi.	144

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.29. %46-47 bağıl nemde, polimer yüzeylerde 900. s’de meydana gelen yüzey kaplama oranının (a) su temas açısı (θ_e), (b) temas açısı karmaşası (CAH), (c) yüzey pürüzlülüğü (R_{rms}), (d) serbest yüzey enerjisi (γ^{total}) ile ilişkisi.	146
7.30. %63 bağıl nemde, polimer yüzeylerdeki izole damlaların yarıçapının (R) zamanla değişimi.	155
7.31. %63 bağıl nemde, polimer yüzeyler üzerine kondense olmuş izole ve sarılı damlaların temas çapının zamana bağlı değişimi.	156
7.32. %63 bağıl nemde, (a) izole, (b) etrafı diğer damlalarla sarılı tekli damlaların hacminin zamanla artışı.	158
7.33. %63 bağıl nemde, polimer yüzeyler üzerine kondense olan izole damlaların kondensasyon hızının ($dV^{2/3}/dt$), (a) temas açısı (θ_e), (b) temas açısı karmaşası (CAH) ile değişimi.	161
7.34. Komşu damla etkisi.	163
7.35. %42-43 bağıl nemde, bakır, cam ve PP plaka üzerine kaplanan PPPE polimerinin çiğlenme sıcaklığının 1°C altında 200x büyültmede çekilen optik mikroskop görüntüleri.	165
7.36. %42-43 bağıl nemde, bakır, cam ve PP plaka üzerine kaplanan PPPE polimerinin çiğlenme sıcaklığının 2°C altında 200x büyültmede çekilen optik mikroskop görüntüleri.	166
7.37. %42-43 bağıl nemde, bakır, cam ve PP plaka üzerine kaplanan PPPE polimerinin çiğlenme sıcaklığının 3°C altında 200x büyültmede çekilen optik mikroskop görüntüleri.	167
7.38. %42-43 bağıl nemde, PPPE kaplı bakır, cam ve PP plaka üzerine çiğlenme sıcaklığının (a) 1°C, (b) 2°C ve (c) 3°C altında kondense olmuş su damlalarının yüzey kaplama oranlarının zamana karşı değişimi.	169
7.39. %42-43 bağıl nemde, bakır, cam ve PP plaka üzerine kaplanan PPPE polimerine çiğlenme sıcaklığının (a) 1°C, (b) 2°C ve (c) 3°C altında kondense olan damlaların sıvı-katı ara yüzeyindeki toplam alanlarının zamana bağlı değişimi.	171

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
7.40. %42-43 bağıl nemde, bakır, cam ve PP plaka üzerine kaplanan PPPE polimerine çiğlenme sıcaklığının (a) 1°C, (b) 2°C ve (c) 3°C altında kondense olan damlaların toplam hacimlerinin zamana bağlı değişimi.	172
7.41. Su toplama denemelerinin gerçekleştirildiği (a) bakır, (b) çelik, (c) cam ve (d) polipropilen yüzeylerin 100x büyültmede çekilmiş optik mikroskop görüntüleri.	173
7.42. Bakır sistem üzerine yerleştirilen (a) bakır, (b) çelik, (c) cam, (d) polipropilen tabakalar üzerinde %75-77 bağıl nemde sabit sıcaklıkta toplanan suyun zamana karşı değişimi.	176
7.43. Bakır sistem üzerine yerleştirilen (a) bakır, (b) çelik, (c) cam, (d), cam üzerine kaplanmış PP, (e) süperhidrofobik PP üzerinde %90 bağıl nemde toplanan su hacminin zamana karşı değişimi.	180
7.44. Peltier sistem kullanılarak çeşitli katı yüzeyler üzerinde, %92 bağıl nemde, 1 saatte toplanan su miktarı ile malzemelerin ısı transfer katsayıları arasındaki ilişki.	182
7.45. Su toplama denemelerinin gerçekleştirildiği ağırlıkça (a) %53,1, (b) %66,5, (c) %76,6, (d) %86,6 vinil asetat içeren PVAc-EVA yüzeylerin 500x büyültmede çekilmiş optik mikroskop görüntüleri.	186
7.46. Dört farklı kompozisyonda vinil asetat içeren PVAc-EVA blend yüzeylerde %92 bağıl nemde toplanan su miktarlarının vinil asetat içeriği ile değişimi.	187

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. van Oss-Good yönteminde kullanılan yüzey gerilimi bileşenlerinin çeşitli test sıvıları için kullanılan değerleri (mN/m) [Good, 1993].	19
3.1. Kuru havanın bileşimi.	26
3.2. Bazı doymuş tuz çözeltilerinin farklı sıcaklıklardaki bağıl nem değerleri [Winston and Bates, 1960].	38
4.1. Bazı katı yüzeylere ait 25°C'deki ısı transfer katsayısı değerleri.	48
4.2. Kondensasyon kriteri [Ma, 1994].	65
4.3. Saf ve hidrolizlenmiş polietilen yüzeylerin karakterizasyonu [Briscoe et al., 2005].	69
6.1. Polimerlerin teknik özellikleri.	86
6.2. Teknik ksilenin fiziksel özellikleri.	86
7.1. Poliolefin yüzeylerin R_{rms} , R_p ortalama, R_v ortalama ve R_t ortalama pürüzlülük değerleri.	102
7.2. Polimer yüzeylerin θ_a , θ_e , θ_r temas açıları ile CAH ve WH değerleri.	106
7.3. Test sıvılarının polimer yüzeyler üzerinde verdiği denge temas açısı (θ_e) değerleri ve van Oss-Good metoduna göre hesaplanan serbest yüzey enerjisi parametreleri.	106
7.4. %63 bağıl nemde, polimer yüzeyler üzerine kondense olan damlaların yüzey kaplama oranının zamanla değişimi.	114
7.5. %63 bağıl nemde, polimer yüzeyler üzerine birim alan başına kondense olan damlaların sayısının zamanla değişimi.	120
7.6. %35-%47 bağıl nemlerde gerçekleştirilen kondensasyon denemelerine ait koşullar.	130
7.7. %63 bağıl nemde, PP yüzey üzerine kondense olan izole ve sarılı damlaların çapının, temas yarıçapının ve hacminin zamanla değişim değerleri.	150

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
7.8. %63 bağıl nemde, HDPE yüzey üzerine kondense olan izole ve sarılı damlaların çapının, temas yarıçapının ve hacminin zamanla değişim değerleri.	151
7.9. %63 bağıl nemde, PPPE yüzey üzerine kondense olan izole ve sarılı damlaların çapının, temas yarıçapının ve hacminin zamanla değişim değerleri.	152
7.10. %63 bağıl nemde, LDPE yüzey üzerine kondense olan izole ve sarılı damlaların çapının, temas yarıçapının ve hacminin zamanla değişim değerleri.	153
7.11. %63 bağıl nemde, EVA yüzey üzerine kondense olan izole ve sarılı damlaların çapının, temas yarıçapının ve hacminin zamanla değişim değerleri.	154
7.12. %63 bağıl nemde, izole ve sarılı damlaların etraflarındaki boş alanlar ve kondensasyon hızları.	158
7.13. %63 bağıl nemde, polimer yüzeyler üzerine kondense olmuş izole ve sarılı damlalar için hesaplanan ΔP (Pa) değerleri ($T_{dış} = 299.5$ K).	159
7.14. %63 bağıl nemde, izole ve sarılı damlalar için teorik değerlerden % sapmalar.	159
7.15. %63 bağıl nemde, komşu damla etkisinin kondensasyon hızında meydana getirdiği azalma.	162
7.16. %42-43 bağıl nemde, bakır, cam ve PP plaka üzerine kaplanan PPPE polimerinin yüzey pürüzlülüğü parametreleri ve çiğlenme sıcaklığının 1°C, 2°C ve 3°C altında bu yüzeyler üzerinde birim alan başına kondense olan damlaların sayısı.	168
7.17. Bakır, çelik, cam ve polipropilen yüzeylerine ait temas açısı ölçüm sonuçları.	174
7.18. Bakır, çelik, cam ve polipropilen plakalarda %50 ve %75 bağıl nemlerde toplanan su miktarları.	174
7.19. Bakır, çelik, cam ve polipropilende %90 bağıl nemde toplanan su miktarları.	178

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
7.20. Peltier sistem üzerine yerleştirilen ısı transfer katsayıları farklı çeşitli malzemeler üzerinde % 92 bağıl nemde 1 saatte toplanan su miktarları.	182
7.21. Bakır, cam ve PP üzerine kaplı PPPE polimerinin yüzeyinden %92 bağıl nemde toplanan su miktarları.	183
7.22. Bakır plaka ve cam üzerine kaplanmış farklı temas açısı değerlerine sahip PP polimer yüzeyleri üzerinden %92 bağıl nemde toplanan su miktarları.	184
7.23. Cam üzerine kaplanmış farklı polimer yüzeyler üzerinde %92 bağıl nemde toplanan su miktarları.	185
7.24. Dört farklı kompozisyonda vinil asetat içeren PVAc-EVA blend yüzeylerin temas açısı ve serbest yüzey enerjisi sonuçları.	185
7.25. Dört farklı kompozisyonda vinil asetat içeren PVAc-EVA blend yüzeylerde %92 bağıl nemde 1 saatte toplanan su miktarları.	186

1. GİRİŞ

Yoğunlaşma, ortamdaki su buharının basıncına bağlı olarak doygunluk sıcaklığından daha düşük sıcaklığa sahip olduğunda sıvı haline dönüştüğü bir faz değişim olayıdır. Dünyada birçok enerji dönüşüm sistemlerinde, havanın neminden su üretme çalışmalarında, kimyasal proseslerde, havalandırma sistemlerinde, otomotiv ve diğer birçok endüstride büyük önem taşımaktadır. Ayrıca ısı değiştiricilerde ısı aktarımını arttırmak için de önemlidir. Ortamdan daha soğuk yüzey üzerinde meydana gelen bu olay, film tabakası ya da damlalar halinde gerçekleşir [Meakin, 1992; Beysens and Knobler, 1986; Beysens, 1995; Beysens, 2006]. Damla tipi kondensasyonda yüzeyde herhangi bir sıvı film tabakası meydana gelmediğinden, ısı transferine direnç azdır. Bu yöntemde ısı transfer katsayısının film tipi kondensasyonla elde edilenden daha yüksek olması (ve dolayısıyla ısı transfer performansının çok daha iyi olması) damla tipi kondensasyona olan ilginin artmasına neden olmuştur [Ma et al., 2000; Rose, 2002].

Kondensasyonun hidrofilik yüzeylerde film tipi, hidrofobik yüzeylerde ise damla tipi olarak meydana gelmesi yüzey özelliklerinin kondense olan suyun davranışında önemli bir role sahip olduğunun en belirgin göstergesidir. Bu sebeptendir ki literatürde “*Breath Figures*” olarak nitelendirilen ve insan nefesinden oluşanlara benzeyen bu damlacıklar uzun yıllar boyunca cam yüzeylerin temizliğini ve homojenliğini test etmekte kullanılmıştır.

Kondensasyon sırasında damlaların büyümesi ve birleşmesi, yüzey kompozisyonu, buhar ve yüzeyin sıcaklıkları, nem ve buharın akış hızından etkilenmektedir. Literatürde soğuk yüzeyler üzerine yoğunlaşma deneyleri genellikle bu yüzeyler üzerine belli basınçta buhar ya da nemli hava gönderilerek yapılmıştır. Bu çalışmalarda katı yüzey olarak çoğunlukla silanlanmış cam [Beysens and Knobler, 1986; Beysens, 1995; Briscoe and Galvin, 1991] ve polietilen [Briscoe et al., 2005] kullanılmıştır. Halbuki, günlük hayatta kondensasyon ile su toplanması, havada bulunan mevcut su buharının bir yüzeyde yoğunlaşmasına bağlıdır. Bu koşullardaki su damlalarının büyüme karakteristiklerinin incelenmesi [Leach et al., 2006] ve hatta difüzyon denklemleri ile açıklanmasını [Sokuler et al., 2010] veren

Çalışma sayısı çok azdır.

Temas açısı, temas açısı karmaşası, serbest yüzey enerjisi ve yüzey pürüzlülüğü gibi yüzeye ait fizikokimyasal özellikler, o yüzeylere kondense olan damlaların hareketini ve büyüme hızlarını direkt olarak etkileyen özelliklerdir [Neumann et al., 1978; Zhao and Beysens, 1995; Leach et al., 2006; Lan et al. 2009; Lan et al. 2010; Sikarwar et al. 2011; Yin et al., 2012]. Literatürde serbest yüzey enerjisi düşük ya da hidrofobik karakterdeki yüzeylerin damla tipi yoğunlaşma hızı üzerine önemli bir rol oynadığı tespit edilmiştir. Damla tipi yoğunlaşmayı arttırmak için düşük serbest yüzey enerjili organik ve polimerik materyaller kullanılmıştır [McCormick and Westwater, 1965; Marto et al., 1986; Holden et al., 1987; Ma et al., 2002]. Bu çalışmalarda, yüzeyde meydana gelen damlalar yüzeyden uygun bir şekilde (rneğın yüzeye eğim verilerek yer çekiminin etkisiyle) uzaklaştırılmakta ve ısı transferi hızlanmaktadır. Literatürde düşük temas açısı karmaşasına sahip süperhidrofobik yüzeyler bu sorun için bir çözüm olarak düşünülmüş ve uygulamada kullanılmıştır [Wier and McCarty, 2006; Dorrer and Ruhe, 2007; Chen et al., 2007; Dorer and Ruhe, 2008]. Ancak, damla tipi kondensasyonun uygulamaya dayalı yönü daha çok ısı transferi temelli olduğundan, literatürdeki çalışmalarda yüzey özellikleri ile damla tipi kondensasyonunun ilişkilendirilmesi daha geri planda kalmıştır.

Tez çalışmasının amacı, atmosferik ortamda çiğlenme noktasının hemen altındaki sıcaklıkta, su damlası yoğunlaşmasını hızlandıracak polimerik yüzeylerin sentezi, karakterize edilmesi ve yüzey özelliklerinin damla kondensasyonuna olan etkisinin incelenmesidir. Bu kapsamda, poliolefin polimer yüzeyler üzerine kondense olan su damlalarının ekirdeklendiğı ve su buharının difüzyonuyla büyüdüğü aşamalarda, yüzeyin pürüzlülüğünün ve buna bağlı parametreler olan başlangıç temas açısı ve temas açısı karmaşasının, o yüzeydeki birim alan başına kondense olan damlacıkların sayısı, damlacıkların toplam hacmi (su damlacıklarının büyüme hızı) ve yüzey kaplama oranı üzerine etkisi incelenmiştir.

Diğerk taraftan, bir katı yüzeyden difüzyon kontrollü damla buharlaşması için türetilen denklemlerin; ters proses olan tek bir izole damlacığın polimer yüzeyler üzerinde çiğlenme koşullarında yoğunlaşma hızı için kullanılıp kullanılamayacağı test edilmiştir. Ayrıca tek bir izole damlanın yoğunlaşma hızının, polimer yüzey

özellikleri ile ilişkisi araştırılmıştır ve bu damlanın büyüme hızına komşu damlaların varlığının etkisi incelenmiştir.

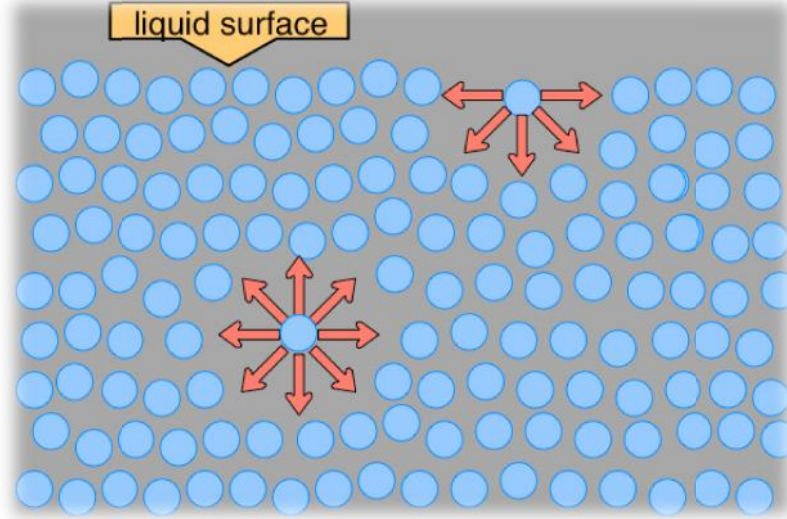
Tez çalışmasında yapılan çalışmalara ilave olarak ısı transfer katsayıları birbirinden farklı metal, cam ve polimer yüzeyler üzerine kaplanan tek bir polimer tipinin üzerinde meydana gelen damla kondensasyonunun hızı incelenmiştir. Ayrıca, bağıl nemi sabit tutulan ortamda, metal ve polimer yüzeyler üzerinde su toplama denemeleri gerçekleştirilmiş ve bunların sonuçları tartışılmıştır.

2. YÜZEY GERİLİMİ ve TEMAS AÇISI

2.1. Yüzey Gerilimi (Serbest Yüzey Enerjisi)

Katı yüzeyler üzerine yoğunlaşma buharın sıvıya dönüşmesini içeren bir faz değişim prosesi olduğundan katı yüzeyler üzerine kondense olan sıvının yüzeyle alakalı özelliklerini tanımak ve bunlara hakim olmak büyük önem taşır. Sıvı içerisindeki moleküller etrafındaki moleküllerle sürekli bir etkileşim içerisindeyler. Sıvı molekülleri arasındaki bu etkileşimler kohesif etkileşimler olarak adlandırılmakta olup etkileşimin derecesi maddenin özelliklerine bağlıdır. Etrafını çevreleyen sıvı molekülleri ile çekim etkileşimleri içerisinde olan tek bir sıvı molekülü kendisine komşu moleküller tarafından her yönden eşit bir kuvvetle çekilir ve bu molekülü çevreleyen moleküller de genelde simetrik olduklarından moleküle etkileyen moleküller kuvvetlerin bileşkesi sıfır kabul edilir.

Ancak sıvı yüzeyinde durum bundan çok daha farklıdır. Sıvı yüzeyinde mevcut bir molekül üzerinde başka hiçbir molekül olmadığından, sadece kendini alttan çevreleyen komşu moleküllerin etkisiyle sıvı içine doğru çekilir. Bu durum sıvı yüzeyindeki diğer tüm moleküller içinde geçerli olduğundan sıvı yüzeyindeki moleküller arasındaki ortalama mesafe, sıvı içindeki moleküller arasındaki ortalama mesafeden daha fazla olur. Diğer bir ifadeyle yüzeyde yatay molekül seyrelmesi oluşur ve sıvı yüzeyi sanki gözle görülmeyen gergin bir zarla kaplıymış gibi davranır. Sıvı yüzeyindeki moleküller arasında meydana gelen bu mesafe artışının oluşturmuş olduğu gerilimden kaynaklanan sıvı yüzeylerinin bu davranışına “*sıvının yüzey gerilimi*” denir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Sıvı içindeki ve sıvı yüzeyindeki moleküllerin birbirleri ile olan etkileşimi. (<http://www.chem1.com/acad/webtext/states/liquids.html>)

Termodinamik açıdan inceleyecek olursak yüzey geriliminin temel sebebi sıvının kendi yüzeyinin potansiyel enerjisini yani dolayısıyla sıvının yüzey alanını minimuma indirmeye çalışmasıdır. Bu yüzden yağmur damlaları yüzey geriliminin etkisiyle verilen bir hacim için en küçük yüzey alanına sahip geometrik şekil olduklarından küresel geometriye sahiptirler.

Serbest yüzey enerjisi ise sabit sıcaklık koşulları altında sıvı yüzeyini 1 m^2 genişletebilmek için tüketilmesi gereken enerjidir. Sıvılar söz konusu olduğunda yüzey gerilimi ile serbest yüzey enerjisi arasında nümerik olarak fark yoktur ancak birimleri farklıdır. Sıvı yüzeyleri dışında, katı yüzeyleri ve çeşitli fazların ara yüzeyleri içinde yüzey gerilimi kavramı söz konusudur. Örneğin A ve B sıvıları birbirleri ile temas halindeyken A ve B moleküllerinin çekimi, A ile A veya B ile B arasındaki çekim kuvvetinden daha küçük ise bu durumda bu iki sıvı birbiriyle karşılıklı bulunabileceklerdir ve aralarında bir ara yüzey ve ara yüzey gerilimi söz konusu olacaktır. Bu ara yüzey gerilimi her iki sıvının ayrı ayrı ölçülen yüzey gerilimleri arasındaki farka eşittir (Eşitlik 2.1) (Antonow Kuralı) [Baykut ve Berkem, 1975; Erbil, 2006].

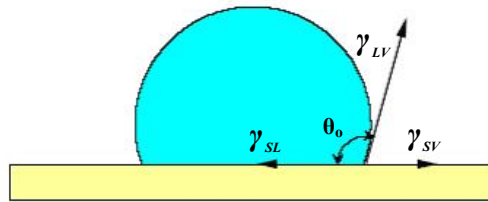
$$\gamma_{AB} = \gamma_A - \gamma_B \quad (2.1)$$

Sıvıların yüzey gerilimleri doğrudan ölçülebilir ve bu ölçüm yöntemleri statik ve dinamik ölçümler olmak üzere ikiye ayrılır. Belirli bir zaman aralığında değişmeden kalan yüzeylerin yüzey gerilimini ölçmeye yarayan yöntemler statik yöntemler olup, kapiler boruda sıvı yükselmesi, damla ağırlığı ve maksimum baloncuk basıncı yöntemleri statik ölçüm yöntemlerine örnektir. Genişlemekte ya da daralmakta olan henüz dengeye gelmemiş yüzeylerin yüzey gerilimini ölçmekte kullanılan yöntemler dinamik ölçüm yöntemleri olup sıvı yüzeyinden halka (Du Noüy) ve plaka (Wilhelmy Plate) koparma direncinin ölçümüne dayanan yöntemlerde dinamik ölçüm yöntemlerine örnektir.

Katı yüzeylerde sıvı yüzeylerde olduğu gibi moleküllerdeki denkleşmemiş kuvvetlerin etkilerinden dolayı bir serbest yüzey enerjisi değerine sahiptirler. Sıvı molekülleri sıvı yüzeyinde sürekli bir hareket halinde olmalarına rağmen katı yüzeylerde böyle bir hareketlilik söz konusu olmadığından, katı yüzeylerdeki serbest yüzey enerjisi sıvılarda olduğu gibi kopma direnci testlerine dayanan doğrudan metotlar kullanılarak tespit edilemez, bunun için temas açısı ölçümlerine dayalı dolaylı metotlar kullanılır [Erbil, 2006].

2.2. Temas Açısı

Temas açısı ölçümü, yüzey gerilimi sıvılarınki gibi doğrudan ölçülemeyen katıların yüzey gerilimini tespit etmek amacıyla kullanılan ve katı bir yüzey bir sıvı ile temas ettiğinde meydana gelen etkileşimleri gözlemlemeye dayanan dolaylı bir ölçüm yöntemidir. “*Temas açısı*” tanım olarak, düz ve yatay duran bir katı yüzey ile bu katı yüzey üzerinde oluşturulan sıvı damlası arasında katı, sıvı ve hava (buhar) fazlarının kesiştiği noktada oluşan teğetin açısıdır (Şekil 2.2).



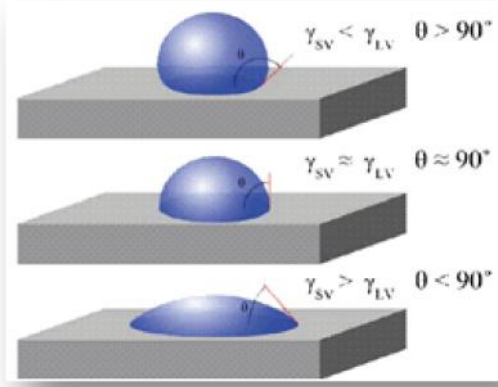
Şekil 2.2. Katı yüzeyi ile üzerindeki su damlasının arasındaki temas açısının şematik gösterimi.

Burada γ_{SL} , γ_{SV} ve γ_{LV} sırasıyla katı-sıvı, katı-buhar ve sıvı-buhar ara yüzey gerilimleridir ve bu üç kuvvet birbiriyle dengededir. “ θ ” ise temas açısını simgelemektedir. Temas açısının temelini oluşturan bu kuvvetlerin denkliği ilk olarak 1805 yılında Thomas Young tarafından tanımlanmıştır ve bu nedenle bu kuvvetlerin denkleğinden yazılan eşitlik “*Young Eşitliği*” (Eşitlik 2.2) olarak bilinir [Young, 1805].

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos \theta \quad (2.2)$$

Temas açısı ölçümü yapılırken çok uçucu ve kıvamlı olmayan sıvı damlaları kullanılır. Su, organik sıvılar ve cıva gibi sıvı metaller temas açısı ölçümünde kullanılabilecek sıvılara örnektir. Ölçümlerde kullanılacak sıvı damlasının hacmi de yerçekimi etkisinden dolayı büyük önem taşır. Yerçekiminden kaynaklanan etkiyi göz ardı edebilmek için ölçümlerde damla hacminin 5-10 μl gibi küçük hacimlerde tutulması gerekir.

Bilindiği üzere sıvının kendi molekülleri arasındaki çekim kuvvetleri kohezyon kuvvetleri, bir sıvı ile bir katı arasındaki çekim kuvvetleri ise adezyon kuvvetleri olarak adlandırılır. Temas açısının büyüklüğü bu kohezyon ve adezyon kuvvetlerinin göreceli büyüklüğüne bağlıdır. Kohezyon kuvvetleri adezyon kuvvetlerinden ne kadar büyük ise, sıvı ile katı arasında meydana gelen temas açısı da o denli büyük olur. Diğer bir ifadeyle düşük temas açısı değerleri kuvvetli bir katı-sıvı etkileşmesinin varlığına işarettir ve bu durumda sıvı katıyı iyi bir şekilde ıslatır ve katı üzerinde yayılır. Tam tersi durum ise yüksek temas açısı değerlerinin zayıf katı-sıvı etkileşimini gösterdiğiidir. Sayısal değerlerle ifade etmek gerekirse, söz konusu sıvı su olduğu durumlarda, temas açısı eğer 90° ’den küçükse su katıyı ıslatıyor demektir ve bu yüzeyler “*hidrofilik yüzey*” (suyu seven yüzey) olarak adlandırılır. Temas açısı değeri 90° ’den büyük bir yüzey ise “*hidrofobik yüzey*” (suyu sevmeyen yüzey) olarak adlandırılır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Su damlası ile vermiş olduğu açıya göre karakterize edilen yüzey çeşitleri. (http://www.tcnano.com/presse.asp?news_id=171&print=news&page=1)

Damla tamamıyla küresel olduğu durumda temas açısı değeri 180° 'dir ancak bu durum pratikte nadiren gözlenir. Diğer taraftan mükemmel olarak nitelendirilecek tam bir ıslatma olabilmesi için temas açısı değerinin 0° olması gerekir (*süperhidrofilik yüzey*). Bu durumda sıvı katı üzerinde ince bir tabaka halinde yayılır. Su damlasının temas açısının 150° 'den büyük olduğu durumlarda yüzey "*süperhidrofobik yüzey*" olarak adlandırılır.

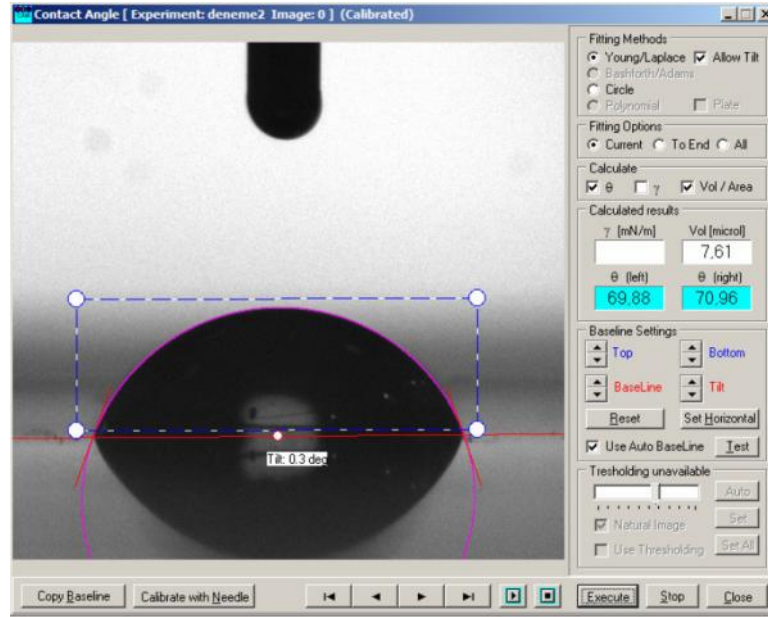
2.2.1. Temas Açısı Ölçüm Metotları

Temas açısı ölçümleri için geçmişten günümüze çok çeşitli metotlar denenmiş olup günümüzde bunlardan sadece birkaç tanesi etkin olarak kullanılmaktadır. En çok tercih edilen metotlardan biri, gözeneksiz ve pürüzsüz düz bir katı yüzey üzerinde video kamera kullanılarak (gonyometre) statik temas açısı ölçümü, diğeri ise hareketli bir katı levhanın test sıvısı içine daldırılmasıyla meydana gelen etkileşim kuvvetlerini ölçmeye yarayan dinamik temas açısı ölçümüdür. Her iki metodunda kendine mahsus avantaj ve dezavantajları mevcuttur.

2.2.1.1. Statik Temas Açısı Ölçümü (Gonyometrik Metot)

Pürüzsüz ve düz bir katı yüzey üzerinde durağan olarak duran damlanın bir video kamera kullanılarak belirli zaman aralıklarıyla kaydedilen profilinin analizine dayanan metottur. Temas açısı fotoğraflanan damlanın şeklinin tanjantı ve katı ile sıvı damlası arasında meydana gelen açının ölçülmesiyle direkt olarak bulunur (Şekil

2.4). Bu amaçla kullanılan gonyometre cihazı bir ışık kaynağı (mavi ışık), örnek standı, video kamera, lens ve görüntü şekli analizi programından ibarettir.



Şekil 2.4. Gonyometrik metot kullanılarak kaydedilmiş damla profilinin işlenmesi ve temas açısı ölçüm penceresi.

Oldukça basit temellere dayalı ve bir o kadar da kullanışlı olan bu yöntemde numune düzgün ya da düzenli bir eğikliğe sahip olması şartı ile oldukça küçük boyutlarda analiz edilebilir. Ölçüm sırasında mikrolitre bazında oldukça küçük ölçekte sıvı kullanıldığından bu yöntem özellikle pahalı sıvılarla çalışırken büyük avantaj sağlar. Diğer taraftan ölçüm sırasında tanjant çizgisinin belirlenmesi (base line) araştırmacının subjektifliği ve tutarlılığına bağlı olduğundan, bu durum hatalı ölçüm alınmasına neden olabilir. Bu problem damla profilinin bilgisayar analizi ile asgariye indirilebilir. Ayrıca yüzeyin damlayı kaldırabilecek büyüklüğe sahip olması gerekliliği de diğer bir dezavantajdır [Erbil, 2006].

Sıvı katı ara yüzeyini karakterize etmek için yukarıda bahsedilen ve “*denge temas açısı*”, “ θ_e ” olarak adlandırılan sadece tek bir statik temas açısının ölçümü yeterli değildir. Young eşitliği (Eşitlik 2.2) türetilirken kullanılan yüzeyin kimyasal olarak homojen ve atomik ölçekte düzgün bir yüzey olduğu kabul edilmiştir. Oysaki gerçek hayatta böyle bir yüzey olmadığı gibi her yüzey belli bir derecede kusurlu

olup heterojendir. Bu nedenle damlanın oluşturulduğu bölgeye ve temas açısının ölçüm tipine bağlı olarak statik temas açısının iki farklı türü daha bulunur.

Bunlardan birincisi damlanın temiz yüzey üzerinde ilerlerken ölçülen *ilerleme temas açısıdır*, θ_a . İlerleme temas açısı ölçülürken paslanmaz çelik iğne sıvı damlasının içerisinde ve tam ortasında bulunmalıdır (Şekil 2.5). Önce küçük hacimde (örneğin 3 μ l) damla yüzeye damlatılır ve paslanmaz çelik iğne bu damlanın içindeyken sıvı hacmi artırılmaya devam edilir (örneğin 5 μ l daha verilir ve toplam hacim 8 μ l'ye tamamlanır) ve bir yandan da sıvı damlası temiz katı yüzey üzerinde ilerlerken damla görüntüsü video kamera tarafından sık aralıklarla kaydedilir. Kaydedilen her bir görüntü için temas açısı değeri cihaz tarafından hesaplanır ve temas açısı değerindeki değişim zamana karşı otomatik olarak grafiğe dökülür. Bu grafikten temas açısının damla hacmi arttıkça arttığı ve bir noktadan sonra ise bir bant verecek şekilde neredeyse sabitlendiği görülür. Bu banta karşılık gelen temas açısı değeri, ilerleme temas açısı olarak adlandırılır.

Bu ölçümü yaparken dikkat edilmesi gerek diğer önemli hususlardan biride ilerleme temas açısı ölçümü sırasında kullanılan paslanmaz çelik iğne hidrofilik özellikte olduğundan iğnenin ucundan çıkan su damlası iğne üzerinde yukarı doğru tırmanır. Bu istenmeyen ve hata veren bir durum olduğundan önüne geçmek için paslanmaz çelik iğnenin hidrofobik olanının satın alınması ya da daha basit bir yol olarak içinden hava geçirilirken (tıkanmaması için) üzerinin parafin ile kaplanmasıdır. Ölçüm sırasında iğne damlada deformasyona neden olduğundan damlaya çok fazla batırılmaz.

İlerleyen temas açısı en çok yüzey pürüzlülüğü ve yüzeyin sahip olduğu kimyasal heterojenlikten etkilenir. Örneğin yüzey pürüzlülüğü olduğunda ya da kimyasal heterojenliğin söz konusu olduğu yüzeylerde damla hidrofobik gruplara denk geldiğinde yüzeyde takılır (pinning effect) ve temas açısı artar. Kimyasal olarak heterojen yüzeylerdeki bu kimyasal enerji bariyerleri, pürüzlü yüzeylerde ise pürüzlülüğün boyutuna bağlı olarak fiziksel enerji bariyerleri oluştururlar. Bu nedenle ilerleyen temas açısı ölçümü sırasında sıvı hacmi minimum hızda verilerek arttırılmalıdır. Sıvı yüzeye yüksek hızda gönderildiğinde birden oluşan büyük damla

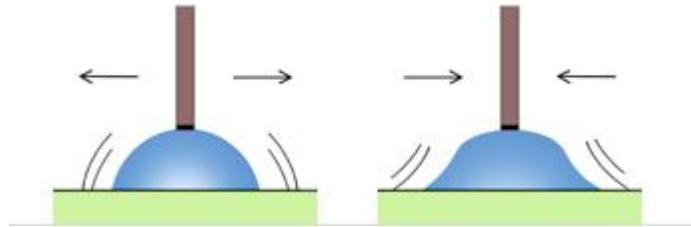
enerji bariyerlerini takılmadan aşar ve ilerleyen temas açısı ölçümünün hatalı yapılmasına neden olur. Dikkat edilmesi gereken bir diğer önemli nokta ise ölçülen ilerleyen temas açısı değeri daha önce aynı yüzey üzerinde ölçülen denge temas açısı değerinden daima büyüktür ya da nispeten az pürüzlü yüzeyler için denge temas açısı değerine eşittir. Ancak asla denge temas açısı değerinden küçük olamaz. Böyle bir durum söz konusu ise doğru ölçüm alınana kadar ilerleyen temas açısı ölçümünün tekrarlanması gerekir.

Statik olarak rapor edilen temas açısı çeşitlerinden ikincisi ise damla yüzey üzerinde gerilerken ölçülen *gerileme temas açısıdır*, θ_r . Gerileme temas açısı daha önce ilerleme temas açısı ölçümünde hacmi arttırılan damla üzerinden yine paslanmaz çelik iğne kullanılarak belli bir miktarda (örneğin 8 μ l üzerinden 5 μ l) sıvı damlası çekerek gerçekleştirilir (Şekil 2.5). Bu ölçüm sırasında iğne damlanın içinde ve aşağıda tutulmalıdır. İğnenin damlanın aşağı bölgelerine kadar sokulmasının nedeni ise küçük gerileyen temas açılarının da ölçülebilmesine olanak vermektir. İlerleme temas açısı ölçümlerinde olduğu gibi gerileme temas açısının ölçümünde de sıvının geri çekilme hızı mümkün olan en düşük hıza ayarlanmalıdır. Şimdiye dek bahsetmiş olduğumuz üç farklı statik temas açısı ölçümü arasında ölçümü en zor olan gerileme temas açısının ölçümüdür ve titizlik gerektirir. Ölçüm sırasında damla yüzeyde gerilerken damla profili video kamera ile oldukça sık aralıklarla (örneğin 1 s) damla iğneden kopana dek fotoğraflanır ve her bir profile ait temas açısı değeri cihaz yardımı ile hesaplatılır. Gerileme temas açısında ilerleme temas açısında olduğu gibi yüzey pürüzlülüğü ve heterojenliğinden şiddetle etkilenir. Damla bu bölgelere takıldığında (pinning etkisi) damla temas çapı sabit kalırken temas açısı değeri azalır. Damla hacmi giderek azalırken damla bir noktada toplanır ve temas açısı değeri anlık olarak artar (ancak asla başlangıç açısına ulaşmaz). Temas açısı değerlerindeki azalma cihaz tarafından zamana karşı otomatik olarak grafiğe dönüştürülür. Temas açısı değerinde meydana gelen anlık artıştan bir önceki değer veya temas açısının bir süre sabit kaldığı değer gerileme temas açısına karşılık gelir. Ölçülen gerileyen temas açısı değeri daha önce aynı yüzey üzerinde ölçülen denge temas açısı değerinden daima küçüktür.

Gerileme temas açısının doğru biçimde ölçülmesi ve rapor edilmesi için daha güvenilir bir metot olan damla buharlaşması ile gerileme temas açısının tayini de

mümkündür. Çünkü yukarıda bahsedilen yöntem kullanılarak gerileme temas açısı tayin edilirken karşılaşılan bazı problemler gerileme temas açısının yanlış rapor edilmesine neden olur. Öncelikle damladan sıvıyı geri çekme hızı değişkendir. Genellikle hassas bir ölçüm için en uygun hız 0,01-0,10 mm/dk'dır. Diğer taraftan ölçüm sırasında iğnenin damlanın içinde olması damlayı deforme eder. Ayrıca ölçüm sırasında buharlaşmada meydana gelmektedir. Yani bir yandan damladan oldukça yavaş hızda sıvı çekilirken diğer taraftan damlanın buharlaşması kaçınılmazdır. Buda temas açısında birden azalmaya ve gerileme temas açısının gözlemlendiği anı kaçırmaya neden olabilir. Bütün bunların önüne geçmek ve ölçümü zor olan gerileme temas açısının tayinini basitleştirmek için yüzeye damlatılan damla kapalı bir hücrede belli ve sabit nemde buharlaştırılır. Biryandan da buharlaşan damlanın sık aralıklarla profili kaydedilir ve cihaz tarafından analiz edilir. Bu şekilde tayin edilen gerileme temas açısı değerleri çok daha güvenilirirdir [Erbil et al., 1999; Erbil, 2006].

İlerleme ve gerileme temas açılarının bir yüzeyi karakterize etmede denge temas açısı tek başına yetersiz kaldığı için denge temas açısı ile birlikte rapor edilmesi oldukça önemlidir.



Şekil 2.5. İlerleme ve gerileme temas açılarının ölçümü.

Su damlası eğer katıyı hiç ıslatmıyorsa hafifçe eğim verilen bir yüzey üzerine bırakıldığında adeta katı bir top gibi kaymadan ve yapışmadan yuvarlanma özelliğine sahiptir. Su damlası katıyı kısmen ıslattığı durumda ise damla zemin üzerine yapışır ve yuvarlanamadığı için kayarak yer değiştirir. Damlanın yüzey üzerinden kayabilmesi için yüzeye verilmesi gereken eğimi temsil eden açıya “*kayma açısı*” denir (Şekil 2.6). Süperhidrofobik yüzeyler için bu açı 5°’den küçüktür.



Şekil 2.6. Kayma açısının şematik gösterimi.

2.2.1.2. Dinamik Temas Açısı Ölçümü (Tensiyometrik Metot)

Statik olarak ölçümü yapılabilen ilerleme ve gerileme temas açıları eğer üçlü faz sınırı (sıvı/katı/buhar) hareketli ise dinamik tensiyometre olarakta bilinen dinamik temas açısı ölçüm cihazı kullanılarak dinamik olarak ta tespit edilebilir. Bu amaçla Wilhelmy Plakası ismi verilen metot kullanılır. Bu metotta dinamik temas açıları ölçülecek olan yüzey ya Wilhelmy plakası boyutlarında kesilir (Wilhelmy Plakası olarak görev yapmak amacıyla) ya da hammaddesi platin olan bu Wilhelmy plakası üzerine kaplanır ve elektronik teraziye bağlı kancaya dikey olarak asılarak salınım yapmayacak şekilde sabitlenir. Bu örnek üzerinde hangi sıvının temas açısı ölçülecekse örnek kabı o sıvı ile doldurulur. Örnek kabı yukarı ve aşağı hareket edebilen bilgisayar kontrollü motorize bir sisteme bağlıdır. Deneme öncesinde yine bu dinamik tensiyometre ile kullanılacak sıvının yüzey gerilimi ölçülür (Wilhelmy plakası ya da daha güvenilir olan Dü Nouy metodunu kullanarak). Daha sonra yapılan dinamik temas açısı ölçümlerinde motor sıvı dolu kabı yukarı doğru kontrollü bir biçimde hareket ettirir ve bu esnada sıvı katı örnek üzerinde tırmanarak yükselmeye başlar. Bu sırada kaydedilen temas açısı ilerleme temas açısıdır. Tam tersi sıvı dolu kap aşağı yönde hareket ederken sıvının ıslanmış yüzeyden geri çekilmesidir ve bu esnada ölçülen temas açısına da gerileme temas açısı adı verir.

Bu metot fazla miktarda sıvı gerektirmesi ve sıvıya dalan katının her iki yüzünün de sıvıya temas etmesinden dolayı katı yüzeyinin çift taraflı kaplanması gerekliliği yüzünden dezavantaj taşır. Ancak gonyometrik yöntem kullanılarak temas açısı tespit edilemeyen fiberler bu yöntem kullanılarak temas açıları tespit edilebildiğinden fiberlerin temas açılarının tayininde avantaj sağlar.

Sağlıklı bir çalışmada bir numuneye ait hem statik ve hem de dinamik değerler birlikte karşılaştırmalı olarak rapor edilir. Dinamik temas açısı değerleri statik olarak elde edilen temas açısı değerlerinden genellikle biraz daha küçüktür [Erbil, 2006].

2.2.2. Temas Açısı Karmaşası (Contact Angle Histeresis)

İdeal yüzeyler kimyasal olarak homojen, mükemmel düzgünlükte (pürüzsüz), buhar veya sıvı tutunmasıyla kimyasal etkileşmelere uğramayan kusursuz yüzeyler olduklarından bu yüzeyler üzerinde tek bir temas açısı değeri (*denge temas açısı*) ölçülür. Kimyasal olarak heterojen ve pürüzlü olan gerçek yüzeylerde ise damlanın temas ettiği hat boyunca farklı temas açısı değerleri okunabileceğinden temas açısı tam anlamıyla Young değerinde değildir fakat onun civarında belirli bir aralıkta değişir. İdeal olmayan bir yüzey üzerinde bulunan bir damla için bu yüzeye eğim verilecek olursa temas açısı ilerleyen sıvı kenarında maksimum ve gerileyen sıvı kenarında minimum değerine ulaşır. Bu yüzden maksimum ve minimum değerler daha önce bahsettiğimiz “*ilerleme*” ve “*gerileme*” temas açıları olarak adlandırılır. İlerleyen ve gerileyen temas açıları arasındaki fark ise “*temas açısı karmaşası, CAH*” (*histeresis*) olarak adlandırılır (Eşitlik 2.3) ve ideal halden ne kadar sapma olduğunun bir göstergesidir.

$$CAH = \theta_a - \theta_r \quad (2.3)$$

İdeal koşullarda olmayan her yüzey bir histeresis değerine sahiptir. Pratikte hiçbir katı yüzeyi tamamıyla homojen ve atomik olarak düz değildir ya da en basitinden herhangi bir sıvı adsorpsiyonu ya da buharla kimyasal olarak etkileşimi sonucu bozulur. Dolayısıyla ilerleme ve gerileme açıları olarak adlandırılan ve temas açısı karmaşasını belirleyen bu iki açı ideal olmayan yüzey üzerinde ölçülmüş olur. Temas açısı karmaşası ideal olmayan yüzeylerde genellikle 10° ile 50° arasında tespit edilir ancak daha yüksek temas açısı karmaşasına sahip yüzeylerde literatürde rapor edilmiştir [Good, 1993]. Genel olarak yüzey pürüzlülüğü ve katı yüzeylerin mikroskobik ölçekteki kimyasal heterojenliği, temas açısı karmaşasını meydana getiren temel nedenlerdir. Ancak bunlarla birlikte yüzeydeki moleküllerin yeniden yönlenmesi (reorientation) ve damla büyüklüğü gibi etkenlerde temas açısı

karmaşasına neden olan durumlar arasında sayılabilir [Good, 1993; Erbil, 2006]. Temas açısı karmaşasına neden olan adezyon enerjisi ise ıslatılabilirliğin histeresisi olarak tanımlanır ve Eşitlik 2.4 ile verilir [Good, 1952; Chen et al., 1991; Chaudhury and Owen, 1993; Extrand and Kumagai, 1997].

$$WH = \gamma_{LV}(\cos\theta_r - \cos\theta_a) \quad (2.4)$$

Burada γ_{LV} sıvı damlasının yüzey gerilimidir.

Pratikte ilerleyen temas açısı gerileyen temas açısından büyüktür, denge temas açısı ise ilerleyen ve gerileyen temas açılarının arasında bir değerdedir. Yüzey ne kadar temiz ve ideale yakın olursa, ilerleme ve gerileme açıları arasındaki farkta o kadar az olur. Heterojenliğin olmadığı, tamamen homojen ve pürüzsüz yüzeylerde (ideal yüzeylerde) ilerleyen ve gerileyen temas açıları birbirine eşittir. Bunun yanında kirlilik, damla boyutu etkisi, yüzeydeki moleküler yer değiştirme ve deformasyon, gözenekler arasına giren sıvı moleküllerinin boyutu ve katı yüzeyindeki yarıklar temas açısı karmaşasını etkileyen diğer faktörlerdendir.

Temas açısı histeresisi düzgün yüzeylerde Eşitlik 2.3 veya ıslatılabilirliğin histeresisi (Eşitlik 2.4) ile tanımlanırken, eğik sistemler söz konusu olduğunda Eşitlik 2.5'te verilen Furmidge eşitliği ile ifade edilir.

$$m g \sin \phi = \omega \gamma_L (\cos \theta_r - \cos \theta_a) \quad (2.5)$$

Bu eşitlikte γ_L eğik düzlemde kendiliğinden hareket eden sıvı damlasının yüzey gerilimi, ϕ minimum eğme açısı (kayma açısı), θ_a ve θ_r sırasıyla ilerleme ve gerileme temas açıları, g yerçekimi kuvveti, m sıvı damlasının ağırlığı ve w hareket yönündeki yatay genişliktir [Oner and McCarty, 2000].

2.2.3. Polimerlerin Serbest Yüzey Enerjisinin Belirlenmesi

Katı yüzeyler üzerindeki temas açısı sıvı-katı etkileşiminin termodinamiğini yansıtır. Temas açısı ölçüm sonuçları katı yüzeylerin serbest yüzey enerjisinin

belirlenmesinde kullanılabilir. Bu amaçla katı yüzey üzerinde oluşturulan bir seri sıvı damlasının temas açısı ölçülür. Katıların serbest yüzey enerjisi değerlerinin belirlenmesinde çok çeşitli yaklaşımlar yapılmış olsa da bunlar içinde en çok sesini duyuran Owens-Wendt (Fowkes) ve van Oss-Good (Asit Baz) yaklaşımları olmuştur. Owens ve Wendt 1969'da Fowkes tarafından öngörülen eşitliği geliştirmiş ve yüzey gerilimini dispersif ve polar kuvvetler olmak üzere iki ana komponente bölmüştür [Owens and Wendt, 1969]. Sıvı ile temas halinde bulunan polimerin adezyon enerjisi,

$$W_a = 2(\sqrt{\gamma_{SV}^d \gamma_{LV}^d} + \sqrt{\gamma_{SV}^p \gamma_{LV}^p}) \quad (2.6)$$

denklemleri verilmiştir. Eşitlik 2.6, Young denklemi (Eşitlik 2.2) ile birleştirildiğinde;

$$\gamma_{LV} (1 + \cos \theta) = 2(\sqrt{\gamma_{SV}^d \gamma_{LV}^d} + \sqrt{\gamma_{SV}^p \gamma_{LV}^p}) \quad (2.7)$$

denklemleri elde edilir.

Owens ve Wendt [1969], polimer yüzeylerin serbest yüzey enerjisini belirlerken su ve metilen iyodür olmak üzere sadece iki adet sıvı damlası kullanmışlardır. Hesaplarında su için $\gamma_{LV}^d = 21,8$ ve $\gamma_{LV}^p = 51,0$, metilen iyodür içinse $\gamma_{LV}^d = 49,5$ ve $\gamma_{LV}^p = 1,3$ mJ/m² olarak kullanmışlardır. Su ve metilen iyodür damlalarının polimer yüzey üzerinde vermiş olduğu temas açısı değerlerini ölçtükten sonra Eşitlik 2.7'yi polimere ait γ_{SV}^d ve γ_{SV}^p değerlerini bulmak üzere iki bilinmeyenli denklem olarak çözmüşlerdir. Polimerin toplam serbest yüzey enerjisini ise bu iki komponenti toplayarak bulmuşlardır (Eşitlik 2.8).

$$\gamma_{SV} = \gamma_{SV}^d + \gamma_{SV}^p \quad (2.8)$$

2.2.3.1. van Oss Good (Asit-Baz) Metodu

1988 yılında van Oss, Good ve Chaudhury iki fazın arasındaki adezyon serbest enerjisinin tayini için makroskopik sistemler arasındaki etkileşimi anlatan Lifshitz teorisi temel alarak yeni bir yöntem geliştirmişlerdir [van Oss et al., 1988; Good, 1993]. Bu yaklaşıma göre bir katı yüzey, Lifshitz-van der Waals etkileşimleri, γ^{LW} , ve asit-baz etkileşimleri, γ^{AB} , olmak üzere iki tip etkileşme içermektedir. Lifshitz-van der Waals etkileşimleri “dispersiyon”, “dipolar”, ve “indüksiyon” etkileşmelerini; asit-baz etkileşimleri ise hidrojen bağlarındaki gibi tüm elektron alma-verme etkileşmelerini kapsamaktadır. Bir katı yüzeye ait toplam serbest yüzey enerjisi ise Lifshitz-van der Waals ve asit-baz etkileşmelerine ait serbest yüzey enerjisi parametrelerinin toplamına eşittir (Eşitlik 2.9).

$$\gamma_i^{Tot} = \gamma_i^{LW} + \gamma_i^{AB} \quad (2.9)$$

Burada Lifshitz-van der Waals etkileşimleri, γ_{SL}^{LW} ;

$$\gamma_{SL}^{LW} = \gamma_S^{LW} + \gamma_L^{LW} - 2\sqrt{\gamma_S^{LW} \gamma_L^{LW}} \quad (2.10)$$

eşitliği ile verilir. Bu eşitlikte “ LW ” Lifshitz-van der Waals etkileşmelerini, “ S ” katıyı, “ L ” ise sıvıyı ifade etmektedir. Katı ve sıvı arasındaki arayüzey gerilimine ait asit baz parametresi, γ_{SL}^{AB} ise;

$$\gamma_{SL}^{AB} = 2\left(\sqrt{\gamma_S^+} - \sqrt{\gamma_L^+}\right)\left(\sqrt{\gamma_S^-} - \sqrt{\gamma_L^-}\right) \quad (2.11)$$

eşitliği ile verilir. Burada “ AB ” asit-baz etkileşmelerini, “ γ_i^+ ” ve “ γ_i^- ” yüzey geriliminin sırasıyla Lewis asidi ve Lewis bazı parametrelerini içermektedir. γ_i^{AB} yüzey geriliminin komponentleri cinsinden;

$$\gamma_i^{AB} = 2\sqrt{\gamma_i^+ \gamma_i^-} \quad (2.12)$$

eşitliği ile ifade edilir. Havada sıvı damla buharının katı yüzey üzerindeki yayılma basıncı ihmal edilebilecek kadar küçük olacağından ($\pi_{SV} = 0$), genel olarak ifade edilen temas açısı eşitliği;

$$\gamma_{LV} (1 + \cos \theta) = 2 \left(\sqrt{\gamma_S^{LW} \gamma_L^{LW}} + \sqrt{\gamma_S^+ \gamma_L^-} + \sqrt{\gamma_S^- \gamma_L^+} \right) \quad (2.13)$$

halini alır. Burada “V” buharı, “ γ_{LV} ” ise sıvının yüzey gerilimini simgelemektedir. γ_S^{AB} terimi Eşitlik 2.13’ten γ_S^+ ve γ_S^- değerleri belirlendikten sonra hesaplanabilir. γ_i^+ ve γ_i^- terimlerinin her ikisi de yüzeye etkileşme halinde ise yüzey “*bipolar*”, sadece bir tanesi yoksa (yani sadece bir tanesi sıfır değeri alıyorsa) yüzey “*monopolar*”, şayet her ikisi de yoksa (yani her iki değer de sıfıra eşitse) yüzey “*nonpolar*” olarak tabir edilir. Bu nedenle γ_i^{AB} değeri nonpolar ve monopolar yüzeyler için sıfıra eşittir ($\gamma_i^{AB} = 0$). γ_i^{AB} değeri yalnızca bipolar yüzeyler için söz konusudur.

Eşitlik 2.13’ü temas açısı verilerine uygulayabilmemiz için birtakım referans sıvılara ait γ_L^{LW} , γ_L^+ ve γ_L^- değerlerine ihtiyacımız olacaktır. Nonpolar sıvılar için $\gamma_{LV}^{LW} = \gamma_{LV}$ olacağından, burada problem dipolar ya da monopolar sıvılara ait γ_L^+ ve γ_L^- değerlerini belirlemektir. van Oss-Good su için γ_L^+ ve γ_L^- değerlerinin birbirine eşit olduğunu kabul ederek ($\gamma_W^+ = \gamma_W^-$) ve su için $\gamma^{AB} = 51,0 \text{ mJ/m}^2$ olduğundan γ_L^+ ve γ_L^- değerlerini Eşitlik 2.9 ve Eşitlik 2.12’den yararlanarak $\gamma_W^+ = \gamma_W^- = 25,5 \text{ mJ/m}^2$ olarak bulmuşlardır ve sonunda yüzey gerilimi komponenti dataları ile birlikte bir seri sıvı seti için bu değerleri hesaplamışlardır (Çizelge 2.1).

γ_S^{LW} , γ_S^+ ve γ_S^- değerlerini hesaplamak için iki metot vardır. İlk metotta γ_S^{LW} değeri metilen iyodür ve α -bromonaftalen gibi bir non-polar sıvı kullanılarak hesaplanabilir. Diğer iki polar sıvıda γ_S^+ ve γ_S^- değerlerinin hesaplanmasında kullanılabilir. Ancak bazen γ_S^+ ve/veya γ_S^- değerleri negatif kök vermektedir. Böyle durumlarda eğer polar sıvılar kullanılmış ise su mutlaka kullanılmalıdır ve ayrıca sudan başka iki polar sıvı olarak etilen glikol ve formamid kullanılırsa oldukça değişken γ_S^+ ve γ_S^- değerleri elde edilebilir. Su-etilen glikol ve su-formamid sistemlerinden elde

edilen γ_S^+ ve γ_S^- değerlerinin ortalaması rapor edilir. İkinci yol olarak Eşitlik 2.13 ikisi polar üç farklı sıvının temas açısı değeri için üçlü denklem olarak aynı anda çözülür. [Good, 1993, Erbil, 2006].

Çizelge 2.1. van Oss-Good yönteminde kullanılan yüzey gerilimi bileşenlerinin çeşitli test sıvıları için kullanılan değerleri (mN/m) [Good, 1993].

Sıvı	γ_{LV}	γ^{LW}	γ^{AB}	γ_{LV}^+	γ_{LV}^-
Su	72,8	21,8	51,0	25,5	25,5
Gliserol	64,0	34,0	30,0	3,9	57,4
Etilen Glikol	48,0	29,0	19,0	1,92	47,0
Formamid	58,0	39,5	19,0	2,28	39,6
Metilen iyodür	50,8	50,8	0	0	0
Dimetil sülfoksit	44,0	36,0	8,0	0,5	32,0
Kloroform	27,2	27,2	0	3,8	0
α -Bromonaftalen	44,4	44,4	0	0	0

van-Oss-Good metodu sadece dispersif ve polar etkileşimleri dikkate alan Owens-Wendt metoduna göre hidrojen bağı etkileşimlerini de dikkate aldığından katıların serbest yüzey enerjisi değerleri rapor edilirken kullanılması gereken daha doğru ve daha gelişmiş bir metottur [van Oss et al., 1988, van Oss and Good, 1992; Good, 1993, Erbil, 2006].

2.2.4. Süperhidrofobik Yüzeyler

Su damlası ile verdiği açı 150° 'nin üzerinde olan yüzeyler süperhidrofobik yüzeyler olarak adlandırılmakta olup bu yüzeyin göstermiş olduğu etki doğada nilüfer çiçeğinde bulunduğundan literatürde de nilüfer (lotus) etkisi olarak nitelendirilir.

Bu yüzeylerin modellenmesi ilk kez 1960'lı yıllarda Johnson ve Dettre tarafından yapılmıştır. Bu araştırmanın temeli, damlanın yarı kararlı (metastable) halleri arasındaki makroskobik titreşim enerjisi ve enerji bariyerlerinin yüksekliği

arasındaki bir denge tarafından belirlenen yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanan temas açısı karmaşasıdır [Dettre and Johnson, 1964].

Su itici özelliğinden dolayı endüstriden tıba kadar çok geniş bir alanda uygulama sahası bulunan süperhidrofobik yüzeyler, morfolojik açıdan incelendiğinde yüzeylerinde düzenli ve düzensiz pürüzlülükler oluşturan süperhidrofobik yüzeyler olmak üzere iki ayrı grupta incelenebilirler. Pürüzlülüğü meydana getiren yüzey üzerinde sivri uçlar, oyuklar ve çizgiler gibi oluşumlar hiyerarşik bir düzende bulunuyorsa düzenli pürüzlü yüzeyler, [Oner and McCarthy, 2000; Motornov et al., 2002], hiyerarşik olmayan bir şekilde bulunuyorsa düzensiz pürüzlü yüzeyler [Onda et al., 1996; Erbil et al., 2003] olarak adlandırılır.

2.2.4.1. Doğal Süperhidrofobik Yüzeyler: Nilüfer (Lotus) Etkisi

Nilüfer bitkisi (Lotus), çamurlu ve kirli ortamlarda yetişen, buna rağmen yaprakları sürekli temiz kalan bir bitkidir. Süperhidrofobikliğin bilim dünyası ile tanışması nilüfer çiçeğinin yapraklarının incelenmesi ile başlamıştır [Barthlott and Neinhuis, 1997]. Asya kültüründe saflığın ve temizliğin sembolü olarak kabul edilen nilüfer çiçeği, yaprağının üzerine gelen toz tanelerini belli bir noktaya yönlendirmekte ve aynı noktaya doğru yönlendirilen yağmur damlaları da bu toz parçacıklarını süpürerek geride tertemiz bir yaprak yüzeyi bırakmaktadır.

Nilüfer yaprağı bu mükemmel görevi yüzeyinde bulunan metrenin birkaç milyonda biri boyutundaki pürüzlerle sağlamaktadır. Bu yaprak herhangi bir cisim ile temas ettiğinde yüzeyindeki temas alanını minimize eden çok sayıdaki mikro ve nano yapıların bileşiminden oluşur. Mikron boyutunda yapıya sahip epidermal hücreler nano büyüklükteki balmumu kristalleri ile örtülmüştür ve pürüzlerin arası hava paketçikleri ile doludur. Hem balmumu kristallerinin zor ıslanabilir özelliğinden ve hem de çok sayıdaki hava paketçığının varlığından ötürü yüzeyde küresel su damlaları oluşur. Su damlalarının küresel olmasının bir diğer nedeni ise belli bir hacim için en küçük yüzey alanına sahip geometrik cismin küre olmasıdır. Temas alanı ve ara yüzey etkileşimi minimize edilmiş olduğundan yaprakların pürüzlü yapısından daha büyük kirler yaprak yüzeyine tutunamadığından yüzeyden yuvarlanarak uzaklaşırlar ve geride tertemiz bir yüzey kalır. Böylece bitki toz, kir ve

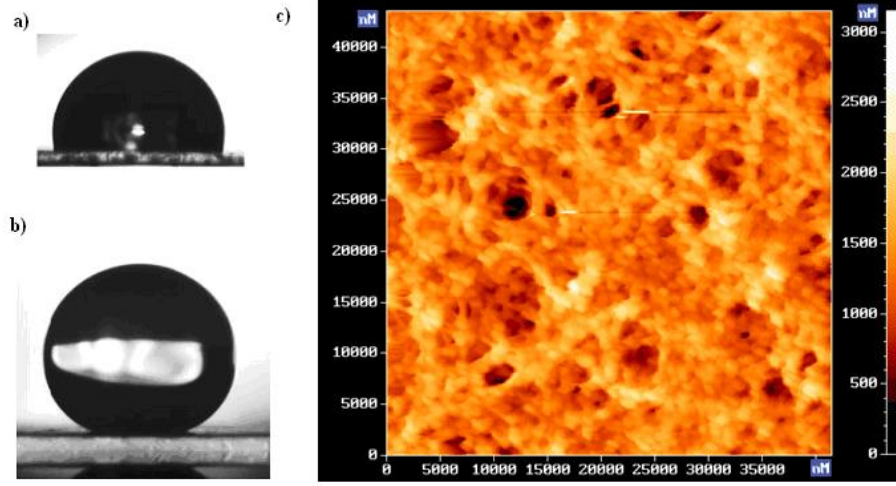
hastalıklardan uzak kalır. Çünkü mikroskobik ölçekteki bakteri ve mikroplar yüzeye tutunamazlar (Şekil 2.7). Doğada bu özellik sadece nilüfer çiçeği yapraklarına özgü olmayıp çok sayıda böceğin, kelebek ve kuş kanatlarının da aynı özelliği gösterdiği bilinmektedir.



Şekil 2.7. a) Lotus yaprağının SEM görüntüsü (Bar: 20 μ m) [Barthlott and Neinhuis, 1997]. b) Lotus yaprağı yüzeyinin bilgisayar grafiği.

2.2.4.2. Yapay Süperhidrofobik Yüzeyler

1990'lı yıllarda doğada süperhidrofobikliği temsil eden nilüfer çiçeği, kuş ve böceklerin kanatlarının özel yapısından esinlenilerek yapay süperhidrofobik yüzeylerin sentezlenmesine başlanılmıştır. 150°'den büyük temas açısı veren bu süperhidrofobik yüzeyler genellikle serbest yüzey enerjisi düşük malzemeler kullanılarak ve yüzey pürüzlülüğü artırılarak hazırlanmıştır. Bunlardan en ilgi çekici olanı basit ve pahalı olmayan bir yöntemle ucuz bir polimer olan polipropilen kullanılarak Erbil ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir (Şekil 2.8). Bu çalışmada ksilen çözücüsü kullanılarak hazırlanan polipropilen çözeltisinin derişiminin artırılmasıyla kaplama kalınlığı ile yüzey pürüzlülüğü artırılmıştır. Böylece düz polipropilen yüzeyde 104° olan temas açısı değeri 149°'ye kadar çıkarılmıştır. Bu çözeltide non-solvent olarak metil etil keton (MEK) kullanıldığında ise bu açı 160°'ye kadar ulaşmıştır. Bunun nedeni su damlası altında kalan gözenekler içerisindeki hava paketçiklerinin artmasıdır [Erbil et al., 2003].



Şekil 2.8. Basit bir plastik olan polipropilenin pürüzlendirilmesi ile süperhidrofobik yüzey sentezi. a) i-PP yüzey üzerinde oluşturulmuş su damlası profili (temas açısı $104^\circ \pm 2^\circ$). b) Pürüzlü i-PP yüzeyde oluşturulmuş su damlası profili (temas açısı 160°). c) Pürüzlülük kazandırılmış i-PP yüzeyin AFM görüntüsü [Erbil et al., 2003].

2.2.5. Pürüzlülüğün Temas Açısı Üzerine Etkisi

Bir yüzeye ait pürüzlülük temas açısını etkileyen en önemli etkenlerden biridir. Yüzey üzerindeki temas açısının düz yüzeylerde 90° 'den az olduğu hallerde, sıvı katıdaki gözeneklerin, çukurların büyük çoğunluğunu doldurur ve bu gözeneklerin ve çukurların içine işler. Böylece kısmen sıvının ve kısmen de katının gerçek bir parçası olan düzgün bir yüzey oluşur. Sıvının, aynı sıvıyla temas açısı sıfır olduğundan, temas açısı azalır. Aksine, temas açısı düz yüzeylerde 90° 'den büyükse, sıvı katıdaki gözenek ve çukurların içine işlemez. Pratikte sıvı ile gözeneklerde tutulmuş hava arasında hiç adhezyon olmadığından temas açısı artar ve böylece sıvının katı-hava düzgün yüzeyinde yayıldığı kabul edilir [Baykut ve Biran, 1986]

Dettre ve Johnson [1964], düz cam yüzeyi üzerine mum püskürterek değişik pürüzlülüklerde yüzeyler elde etmişlerdir. Bu örneklerin yüzeylerini çeşitli ısı uygulamalarıyla düz hale getirilmiştir. Pürüzlülüğün ölçeğinin tek nicelik olmasına rağmen, $100\ \mu$ ile $10\ \mu$ arasında değişen kümelenmeler oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Bu yüzeylerdeki statik temas açısının 105° 'dir. Pürüzlülüğün artmasıyla birlikte, ilerleyen temas açısındaki artma, gerileyen temas açısındaki azalmayla karmaşanın 15° - 100° arasındaki değerlerde değişmesine sebep olur. [Dettre and Johnson, 1964].

Düz bir yüzeydeki sıvı damlasının temas açısının Young eşitliği ile verildiğinden bahsetmiştik (Eşitlik 2.2). Young eşitliği makroskobik bir yaklaşım olduğundan gerçek heterojen yüzeyler söz konusu olduğunda geçerli olmaz. Örneğin, oldukça küçük skalalar da modellenmiş pürüzlü yüzeylerin ıslatılabilirliğini açıklamada yetersiz kalır [Porcheron and Monson, 2006]. Ancak Young eşitliği sıvıların katı yüzeyleri nasıl ıslattığının anlaşılmasında bir başlangıç noktası olmuştur. Söz konusu temasın çeşidi katı-buhar ve katı-sıvı yüzey gerilimleri arasındaki fark ölçüldüğünde sıvı ya da buhar fazları için katının göreceli çekimiyle belirlenir. Bu fark pozitif olduğunda 90° 'den küçük, negatif olduğunda ise 90° 'den büyük temas açısı elde ederiz. Limit noktalarda yani $\cos \theta = 1$ olduğunda sıvı yüzeyi tamamen ıslatırken, $\cos \theta = -1$ olduğunda sıvı yüzeyi ıslatmaz ve kuru bir yüzey elde ederiz.

Temas açısı üzerine yüzey pürüzlülüğünün etkisi ile ilgili ilk çalışmalar Wenzel [1936] ile Cassie ve Baxter [1944] tarafından yapılmıştır. Heterojen yüzeylerde mevcut olan heterojenlik iki form bakımından incelenebilir. Birincisi Wenzel'in ele aldığı biçimde olan lokal geometrinin heterojenliği modelidir. İkincisi ise Cassie-Baxter'ın ele aldığı yüzeyin kimyasal heterojenliğidir.

2.2.5.1. Wenzel Teorisi

Wenzel teorisinde yüzey üzerine damlatılan sıvının pürüzlü yüzeyin oluşturduğu boşlukları doldurduğunu ve damlanın üst yüzeyindeki (sıvı-gaz yüzeyi) serbest sıvı alanındaki artışın, pürüzlü yüzeyde de aynı şekilde gerçekleştiğini ve böylelikle gerçek yüzeyin düzgün yüzeye oranla daha fazla miktarda ıslandığını belirtmiştir (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Wenzel modeline göre pürüzlü bir yüzey üzerindeki sıvı damlası.

1936 yılında Wenzel'in hazırladığı bu modelde, ıslatılabilirlik ile pürüzlülük arasındaki ilişki açıklanmakta olup, gerçek yüzeyle geometrik yüzey arasındaki ayırım “ r ” ile ifade edilen pürüzlülük faktörü ile ortaya koyulmaktadır. Pürüzlülük faktörü gerçek yüzeyle geometrik yüzey arasındaki orandır. Wenzel, Young eşitliğinde (Eşitlik 2.2) verilen yerel temas açısından yola çıkarak kimyasal olarak gerçek heterojen ve pürüzlü bir yüzey üzerindeki açığı “ θ_f ” olarak belirlemiştir. Wenzel yaklaşımında yüzey pürüzlülüğünün damla boyutunun yanında oldukça küçük skalada olması gerekmektedir [Wenzel, 1936].

$$\cos \theta_f = r \cos \theta \quad (2.14)$$

Burada θ_f , ıslatılmış yüzeyde ölçülen temas açısı (Wenzel açısı); θ , düzgün yüzeydeki temas açısı (Young açısı), ve r , pürüzlülük faktörü olup gerçek alanın yukarıdan görülen kesit alana oranıdır.

$r = 1$ olduğu durum tamamıyla düzgün yüzeyi ifade eder (Young Denklemi)

$r > 1$ olduğu durum ise pürüzlü yüzeyi ifade eder (Wenzel Denklemi)

Wenzel eşitliği iki çeşit durumu içerir:

1. $\theta < 90^\circ$ (hidrofilik katı), $\theta_f < \theta$ ve $r > 1$ durumu
2. $\theta > 90^\circ$ ve $\theta_f > \theta$ olması durumu

2.2.5.2. Cassie-Baxter Teorisi

Cassie-Baxter teorisi, Wenzel teorisinin geliştirilmiş şekli olup sıvının pürüzlü yüzeydeki girintileri doldurmadığını kabul eder. 1944'te ortaya atılan bu modelde sıvı ve yüzey arasındaki ara yüzey, sıvı-katı ve sıvı-buhar arayüzeyi olmak üzere iki fazdan oluşur. Pürüzlü yüzey üzerindeki girintiler tamamen hava ile dolu olup bu hava paketleri sıvıyı tamamen yukarı itmiştir (Şekil 2.10) [Patankar, 2003].



Şekil 2.10. Cassie-Baxter modeline göre pürüzlü bir yüzeydeki sıvı damlası.

Bu sebepten ötürü Wenzel eşitliğine pürüzler arasında hapsedilen havanın alan fraksiyonunu da girmemiz gerekir. “ φ_{hava} ” hapsedilen havanın alan fraksiyonunu ve “ φ_S ” katı-sıvı ara yüzeyinin alan fraksiyonunu göstermek üzere Cassie-Baxter temas açısı;

$$\cos \theta_C = \varphi_S \cos \theta_S + \varphi_{hava} \cos \theta_{hava} \quad (2.15)$$

$$\cos \theta_C = \varphi_S \cos \theta_S + (1 - \varphi_S) \cos 180 = \varphi_S \cos \theta_e + \varphi_S - 1 \quad (2.16)$$

$$\cos \theta_C = -1 + \varphi_S (\cos \theta_S + 1) \quad (2.17)$$

olarak elde edilir.

θ_S : Kompozit yüzeyde ölçülen temas açısıdır.

φ_S : Katı yüzeyin alan kesridir.

Ancak son yıllarda yapılan çalışmalarda temas açısı ve temas açısı karmaşasının temas çizgisinin bir fonksiyonu olduğu ve ıslanabilirliğin de termodinamik yerine damlanın hareketinin kinetiği ile açıklanabileceğini vurgulanmaktadır. Deneysel çalışmalarla Wenzel ve Cassie-Baxter eşitliklerinin su iticilikle doğrudan ilgili olmadığını ve su damlası altındaki katı-sıvı ara yüzeyin temas açısını etkilemediğini, temas açısının temas çizgisi ile ilgili olduğunu göstermektedirler. Mikro-desenli süperhidrofobik yüzeylerde Wenzel eşitliğinin geçersiz olduğu ve Cassie-Baxter eşitliğinin de sınırlı boyut ve geometride süperhidrofobik yüzeyler için geçerli olduğu savunmaktadırlar. [Gao and McCarty, 2007; Erbil and Cansoy, 2009].

3. NEMLİ HAVA ve ÖZELLİKLERİ

Hava azot, oksijen ve başka gazların küçük miktarlarından oluşan bir karışımdır. Havanın istenilen sıcaklık, nem, temizlik ve sirkülasyon hızı bakımından kontrol altına alınması için yürütülen prosese “iklimlendirme” adı verilir. Evler, hastaneler, laboratuvarlar, toplantı salonları, ofisler, alışveriş merkezleri, fabrikalar iklimlendirme prosesinin yürütüldüğü uygulama alanları arasında sayılabilir. Bulunulan ortamı ya da endüstriyel bir tesisi istenilen sıcaklık ve nem koşulları altında tutabilmek için sıcaklığın yükseltilmesi, sıcaklığın düşürülmesi, ortama su buharının eklenmesi veya ortamdan su buharının çekilmesi gibi iklimlendirme işlemlerine ihtiyaç duyulur. Ortamın istenilen sıcaklık ve nem düzeyine getirilebilmesi için bazen bu işlemlerden birkaçının bir arada uygulanması ve kuru hava, atmosferik hava gibi tanımların iyi bilinmesi ve birbiriyle karıştırılmaması gerekir.

Havanın içerdiği su buharına “nem” denir. Atmosferik hava, içerisinde bir miktar su buharı (nem) içerir. İçinde su buharı ihtiva etmeyen hava ise “kuru hava” olarak adlandırılır. Ortalama molekül ağırlığı 28,966 g/mol olan kuru havanın içerisinde bulunan başlıca gazlar ve molce karışım oranları Çizelge 3.1’de verilmektedir.

Çizelge. 3.1. Kuru havanın bileşimi.

Bileşen	Simge	Karışım Oranı (mol/mol)
Azot	N ₂	0,78
Oksijen	O ₂	0,21
Argon	Ar	0,0093
Karbon dioksit	CO ₂	365x10 ⁻⁶
Neon	Ne	18x10 ⁻⁶
Ozon	O ₃	0,01-10x10 ⁻⁶
Helyum	He	5,2x10 ⁻⁶
Metan	CH ₄	1,7x10 ⁻⁶
Kripton	Kr	1,1x10 ⁻⁶
Hidrojen	H ₂	500x10 ⁻⁹
Azot oksit	N ₂ O	320x10 ⁻⁹

Havayı su buharı ile kuru havanın karışımı (*nemli hava*) olarak düşünmek daha doğrudur. Çünkü hava içerisindeki kuru hava bileşimi sabit kalırken, su buharı miktarı çevre şartlarına ve meteorolojik faktörlere bağlı olarak buharlaşma veya yoğunlaşma sonucu değişir. Her sıcaklıkta buharlaşabilen su sayesinde havada her zaman su buharı bulunur [Çengel and Boles, 1998].

“*Psikrometri*” nemli havanın termodinamik özellikleri ile bu özellikleri kullanarak nemli havadaki işlemler ve şartlar ile ilgilenen termodinamiğin bir dalıdır. Havadaki nemin ifade edilebilmesi için; buhar basıncı, mutlak nem ve bağıl nem gibi terimler kullanılır.

3.1. Sıvıların Buhar Basıncı

Sıvılar her sıcaklıkta buharlaşabilme özelliğine sahiptirler. Kapalı bir kap içerisinde bulunan sıvı buharlaşır ve oluşan sıvı buharı kabın çeperlerine bir baskı yapar. Buna “*sıvının buhar basıncı*” denilir. Buhar basıncı belli bir sıcaklıkta, buhar ve sıvı yüzeyi arasındaki buharlaşan ve yoğunlaşan moleküllerin sayısı arasında bir dengeye ulaşıncaya, o sıcaklık için sabit bir değere ulaşır ve “*sıvının doymuş buhar basıncı*” adını alır. Her sıvıya ait doymuş buhar basıncı, sıcaklığın yükselmesi ile artar. Örneğin su için 25°C’de doymuş buhar basıncı değeri 23,76 mmHg iken bu değer sıcaklık 100°C’ye çıkınca 760 mmHg’ya yükselir.

Kinetik teori bu olayın açıklanmasında bizlere kolaylık sağlar. Sıvı içerisindeki moleküllerin hızları tıpkı gazlarda olduğu gibi birbirine eşit değildir ve bir hız dağılımı mevzu bahistir. Yani sıvı içerisinde ortalama hız değerine sahip sıvı moleküllerinin yanı sıra, çok yavaş ve çok hızlı hareket eden sıvı molekülleri de mevcuttur. Hızlı hareket eden sıvı molekülleri yüzeye doğru hareket ederek kendilerini içeri çeken kohezyon kuvvetlerini kendi sahip oldukları kinetik enerjilerinin fazlalığı sayesinde yenerlerse, sıvı yüzeyinden dışarı kaçarlar ve yukarılarındaki boş alana, yani buhar fazına geçerler. Bu sırada buhar fazında mevcut moleküllerin bir kısmı da uçarken sıvı yüzeyine çarpmakta ve çarptıkları yüzeyin sıcaklığı kendi doyumluk sıcaklıklarından düşük olduğundan burada yoğunlaşarak içeri dönmektedirler. Dışarı kaçan moleküllerin sayısı, içeri dönen moleküllerin

sayısına eşit olduğunda denge meydana gelmiş ve ölçülen buhar basıncında sabitlenmiş olur. Ölçülen bu sabit buhar basıncı da “*sıvının doymuş buhar basıncı*” olmuş olur. Bu sabit buhar basıncındaki sıvı artık daha fazla buharlaşamaz. Şayet bu esnada sabit sıcaklıkta iken buhar fazının basıncını azaltırsak (yani vakum uygularsak), sıvı derhal buharlaşmaya başlar. Tam tersi durumda ise, yani buhar fazına basınç uygularsak, bu defa buhar yoğunlaşarak sıvıya geri dönmeye başlar. Her iki durumda da belli bir süre sonra yeni dengeler oluşur.

3.2. Bağıl Nem ve Mutlak Nem

Havanın içerdiği su buharı miktarı olarak tanımlanan havanın nemi “*bağıl nem*” ve “*mutlak nem*” olmak üzere iki türde ifade edilebilir. Havadaki nemin mutlak miktarını göstermeyen bağıl nem, belli sıcaklık ve belli basınçta 1m^3 nemli havanın içinde ihtiva ettiği su buharı miktarının, aynı sıcaklık ve basınçta içebileceği maksimum su buharı miktarına oranı olup yüzde değer (%) olarak ifade edilir. Bağıl nem, havanın neme ne oranda doymuş olduğunu gösterir. Herhangi bir sıcaklık için havadaki buharlaşma ve yoğunlaşma dengesinin bir göstergesi olup havanın denge buhar basıncına olan uzaklığı veya yakınlığı hakkında bilgi verir.

Bağıl nem değeri %100 olarak okunduğunda, su buharıyla dinamik olarak dengede demektir. %60 bağıl nem denildiğinde ise havanın doymuş hale gelebilmesi için gerekli su buharı miktarının %60’ını içeriyor demektir. Ortam ısısının artırılması aynı hacimdeki havanın doyma oranını yükseltir. Ters durumda ortamın ısısı azaltıldığında daha az oranda doyar. Bu nedenle sıcaklıktaki yükselme bağıl nem değerini düşürürken, sıcaklıktaki düşüş bağıl nem değerini artırır.

Termodinamik tanım olarak bağıl nem ($\%RH$), havada mevcut su buharının kısmi basıncının (P_v), aynı sıcaklık ve basınçta doymuş durumdaki havanın kısmi buhar basıncına (P_{vs}) oranıdır.

$$RH = \frac{P_v}{P_{vs}} \times 100 \quad (3.1)$$

Kuru hava için $P_v = 0$ olduğundan $RH = \%0$, doymuş nemli havada $P_v = P_{vs}$ olduğundan $RH = \%100$ ve doymamış nemli hava için $P_v < P_{vs}$ olduğundan $\%0 < RH < \%100$ değerleri elde edilir.

Isınan havanın hacmi genişleyeceğinden ve alabileceği nem miktarı artacağından sıcaklık artışı ile bağıl nem azalır. Tersine soğuyan havanın hacmi daralacağından ve alabileceği nem miktarı azalacağından sıcaklık azalması ile bağıl nem artar ve havanın nem açığı azalır. 1 m^3 nemli havanın gram olarak içerdiği su buharı miktarının kuru hava miktarına oranına “mutlak nem” (w) denir. Mutlak nem, 1 kg kuru havanın içerdiği su buharı miktarı olarak da tanımlanabilir. ($w = \text{gram su buharı} / \text{gram kuru hava}$)

$$w = \frac{m_v}{m_a} \quad (3.2)$$

Spesifik nem olarak ta adlandırılan mutlak nem, kuru hava ve su buharının kısmi basınçları ve molekül ağırlıkları cinsinden de yazılabilir.

$$m_v = \frac{P_v V}{R_v T} = \frac{P_v V M_v}{\bar{R} T} \quad (3.3)$$

$$m_a = \frac{P_a V}{R_a T} = \frac{P_a V M_a}{\bar{R} T} \quad (3.4)$$

$$w = \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} = \frac{R_a P_v}{R_v P_a} = \frac{M_v P_v}{M_a P_a} \quad (3.5)$$

Bir gaz karışımının toplam basıncı, karışımı oluşturan gazların kısmi basınçlarının toplamına eşit olacağından eşitlikte $P = P_a + P_v$ ve $P_a = P - P_v$ yazılırsa ve su buharının molekül ağırlığının kuru havanın molekül ağırlığına oranı olan 0,622 yerine yazılırsa;

$$w = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (3.6)$$

elde edilir. Daha öncede bahsedildiği gibi bağıl nem ($\%RH$) havada mevcut su buharının kısmi basıncının (P_v), aynı sıcaklık ve basınçta doymuş durumdaki havanın kısmi buhar basıncına (P_{vs}) oranı olduğundan; mutlak nem bağıl nem değerlerini de içerecek şekilde yazılacak olursa Eşitlik 3.7 elde edilir.

$$w = 0,6219 \frac{RH (P_{vs})}{P - RH (P_{vs})} \quad (3.7)$$

3.3. Çiğ (Şebnem) Noktası Sıcaklığı ve Bağıl Nem ile İlişkisi

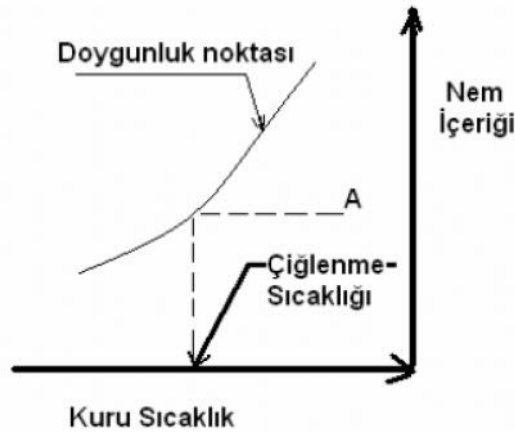
Nemin yüksek olduğu yaz sabahları uyandığımızda bahçemizdeki çimenlerin ıslak olduğunu görürüz. Oysaki gece yağmur yağmamıştır. Yine nemli ve sıcak bir yaz gününde buzdolabından bir kutu soda çıkardığımızda dış yüzeyinin buğulandığına şahit olmuşuzdur. Bütün bu olayların sebebi havadaki aşırı nemin soğuk yüzeylere çarptığında birden yoğunlaşması ve “çiğ” adı verilen minik su damlacıklarını oluşturmasıdır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1. Çiğlenmenin meydana geldiği yüzeylere örnekler.
(www.sciencephoto.com)

Yaz mevsiminde yüksek sıcaklık nedeniyle gün boyunca büyük miktarlarda su buharlaşması olur. Sıcaklığın düştüğü akşam vakitlerinde ise havanın nem tutma kapasitesi, diğer bir ifade ile taşıyabileceği maksimum su buharı miktarı azalır. Bir müddet sonra havanın nem tutma kapasitesi ile havanın içermiş olduğu su buharı miktarı eşitlenir. İşte tam bu noktada hava neme doymuş haldedir ve bağıl nemi %100'dür. Sıcaklığın bir miktar daha düşmesi ise havada mevcut su buharının bir miktarının yoğunlaşmasına neden olur ve böylece çığ oluşumu başlar. Hava doymun halde olmadığı durumda soğutulsa da belli bir sıcaklığa ulaşınca kadar yoğunlaşma meydana gelmez. Yoğunlaşma su buharının kısmi basıncının, bu sıcaklıkta doymun haldeki su buharı basıncına eşit olduğu anda başlar.

“Çığ (Şebnem) Noktası Sıcaklığı”, hava sabit basınçta soğutulduğunda nemli havanın içerdiği su buharının yoğunlaşmaya başladığı sıcaklığa denir. Çığlenme sıcaklığında hava su buharı ile doymun hale gelmiştir. Dolayısıyla nasıl ki bağıl nem havadaki nemin ne kadar olduğunun bir ölçüsü ise çığlenme sıcaklığı da havadaki su buharının ne kadar olduğunun kesin bir ölçüsüdür (Şekil 3.2).



Şekil 3.2. Çığlenme sıcaklığının şematik olarak gösterimi.

Şekil 3.2'den görüldüğü üzere başlangıçta A durumunda olan nemli hava ile doldurulmuş bir kap düşünelim. Bu kap sabit nemde ve sabit buhar basıncında soğutulursa, sıcaklık doymunluk çizgisine ulaşır ve işte bu noktada su buharı yoğunlaşır. Çığlenme sıcaklığı bu doymunluk noktasına ulaşmadan önceki yoğunlaşmanın başladığı ilk sıcaklık olarak tanımlanır.

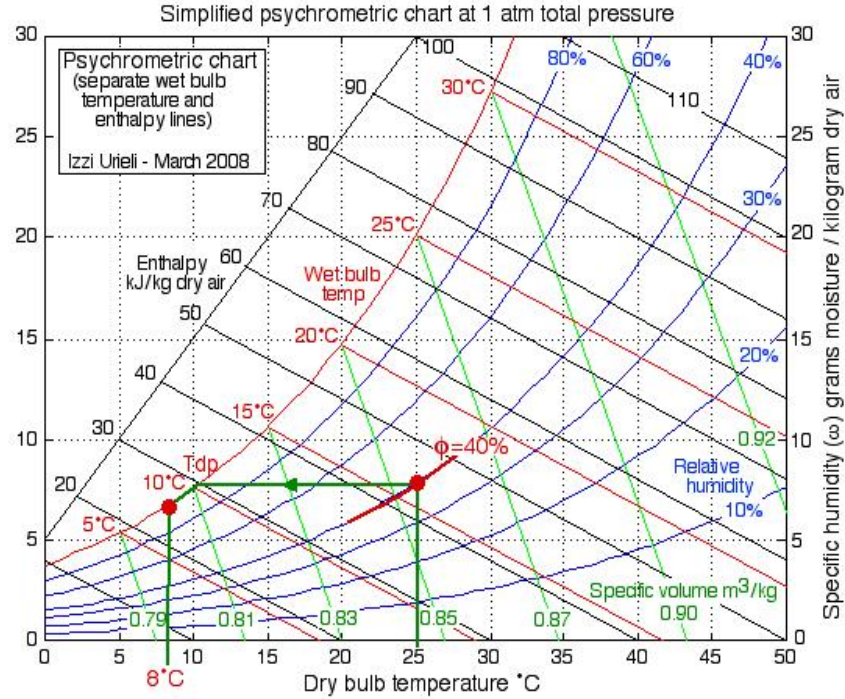
3.3.1. Çiğlenme Noktasının Psikrometrik Diyagram ile Belirlenmesi

Psikrometri, nemli havanın termodinamik özellikleri ile bu özellikleri kullanarak nemli havadaki işlemler ve şartlar ile ilgilenen termodinamiğin dallarından biridir. Bu diyagramlar genellikle kapalı mekanları istenilen nem ve sıcaklık koşullarına getirmek amacıyla gereken hesapları yapabilmek için kullanılırlar. Çiğlenme noktasının belirlenebilmesi içinde psikrometrik diyagramlardan yararlanır. Bu diagramlarda kuru ve yaş termometre sıcaklığı gibi terimler yer alır. “*Kuru termometre sıcaklığı*” haznesinin etrafı kuru ve hava ile temas halinde olan normal bir termometre ile ölçülen hava sıcaklığıdır. Haznesi ıslak bir bezle sarılı termometrenin normal hava akımı sağlanıp hazne etrafındaki hava doygunluk sınırına getirildiğinde termometrenin gösterdiği sıcaklığa ise “*yaş termometre sıcaklığı*” denir.

Psikrometrik diyagramlarda atmosferik havanın belirli basınçlarda, bağıl nem özgül hacim, entalpi, kuru ve yaş termometre sıcaklıklarına ait veriler hesaplanıp belirlenmiştir. Şekil 3.3’te, 1 atm toplam basınca göre hazırlanmış örnek bir psikrometrik diyagram verilmiştir.

Bir psikrometrik diyagram y ekseninde (gram nem/kg kuru hava) cinsinden mutlak neme (specific humidity), x eksenini ise kuru termometre sıcaklığına (dry bulb temperature) ait verileri bulundurmaktadır.

Belli bağıl nem ve sıcaklık koşulları için psikrometrik diagram kullanılarak çiğlenme sıcaklığının nasıl bulunduğu Şekil 3.3’te gösterilmektedir.



Şekil. 3.3. Psikrometrik diagram ve çiğlenme sıcaklığının psikrometrik diyagram yardımı ile bulunuşu.

(www.ent.ohiou.edu/~thermo/Applied/Chapt.7_11/Psychro_chart/psych_foggy)

Örneğin sıcaklığın 25°C, bağıl nemin %40 ve mutlak nemin de 7 olduğu durum için öncelikle sıcaklık ve bağıl neme ait değerlerin kesişim noktaları diyagram üzerinde işaretlenir. X eksenine yatay bir şekilde %100 bağıl nem değerine sahip olan doyma eğrisine kadar bir doğru çizilir. Çizilen doğrunun %100 doyma eğrisi üzerinde mutlak nem değerinin y- ekseninde 7 olduğu değere eğri üzerinde gidilir ve nokta işaretlenir. Bu noktaya x- ekseninde karşılık gelen sıcaklık değeri bu koşullar için çiğlenme sıcaklığıdır. Buradan 25°C, %40 bağıl nem ve mutlak değeri 7 olan su buharının çiğlenme noktası sıcaklığı 8°C olarak bulunur.

3.4. Hava Nemini Ölçmede Kullanılan Metotlar

Havadaki nemi ölçmeye yarayan cihazlara “*higrometre*” adı verilir. Havanın bağıl nemini ölçmek için kuru-yaş termometre (psikrometre), çiğ noktası higrometresi, saçlı higrometre, elektriksel direnç higrometre gibi metotlar kullanılır.

3.4.1. Kuru - Yaş termometre metodu (Psikrometre)

Psikrometre kuru ve yaş olmak üzere iki adet termometreden ibaret olup bu termometreler daha önce bahsedilen biri normal yani hava ile direkt temasta olan kuru termometre, diğeri ise haznesinin üzeri damıtık su ile sürekli olarak ıslatılan bir fitille kaplı yaş termometredir (Şekil 3.4). Bu metotta kuru termometre ile nemli havanın sıcaklığı ölçülürken yaş termometre ile doymunluk anındaki sıcaklık ölçülmektedir.



Şekil 3.4. Kuru- yaş hazneli psikrometri.

(<http://www.turkeyforum.com/satforum/showthread.php?t=540527&page=59>)

Hava doymun halde değilse, yaş termometrenin ıslak haznesindeki fitilin suyu buharlaşır ve hava içine difüze olur. Fitilin içinde kalan suyun sıcaklığı, sudan havaya doğru ısı iletimi meydana geldiği için soğur ve yaş termometrenin gösterdiği sıcaklık kuru termometrenin gösterdiği sıcaklığın altına düşer. Isı iletimi hava ve suyun sıcaklıkları eşitlendiğinde sona erer. Ancak hava su buharı ile doymun hale gelmemiş ise buharlaşma devam eder ve böylece suyun sıcaklığı havanın sıcaklığının altına düşer. Bu durumda ise havadan suya ısı iletimi başlar ve bu iletim hava ve nemli fitil arasında bir sıcaklık dengesi kuruluncaya dek devam eder. Bu sırada konveksiyonla iletilen ısı, fitilden suyun buharlaşması için gereken gizli ısıya eşittir.

Denge anındaki sıcaklık atmosferik şartlara ve fitilin üzerinden geçen gaz akış hızına bağlıdır. Bu sırada ölçülen denge sıcaklığına “*Psikrometrik Yaş Termometre Sıcaklığı* (t_s)” denir. Yaş termometrenin sıcaklığı nemli fitil ve hava arasındaki kütle

ve ısı transferi oranlarına dayanır. Su üzerinden hava cereyanı geçirmek suretiyle su en fazla bu sıcaklığa kadar soğutulabilir. Hava su buharına doyduğunda ise ıslak fitilden daha fazla su buharlaşmaz. Bu durumda kuru ve yaş termometre sıcaklıkları birbirine eşittir ($t_k=t_s$). Buradan yola çıkarak doymamış nemli hava için her durumda yaş termometre sıcaklığının, kuru termometre sıcaklığından daha düşük olup buharlaşma hızının havanın kuruluşuna bağlı olduğunu söyleyebiliriz. Nem yüksek olduğunda buharlaşma oranı düşüktür ve iki termometre sıcaklıkları arasındaki fark da düşüktür. Her iki termometrenin gösterdiği sıcaklık değerleri arasındaki fark ne kadar fazlaysa hava o kadar kuru, ne kadar azsa hava o kadar nemli olur. Yaş ve kuru termometre sıcaklıklarına göre havanın bağıl nemi;

$$\Delta t = t_k - t_s \quad (3.8)$$

$$RH = \frac{P_{vs}(t_s) - \frac{1}{2} \Delta t}{P_{vs}(t_k)} \quad (3.9)$$

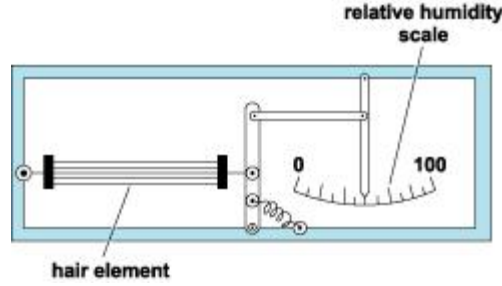
eşitlikleri yardımıyla hesaplanabilir. Ayrıca bu eşitliklerden faydalanılarak özel çizelgeler (psikrometrik diyagramlar) hazırlanmıştır. Bu çizelgelerle kuru termometre sıcaklığı ile kuru ve yaş termometre sıcaklıkları arasındaki farktan faydalanılarak ve basınç değerleri de dikkate alınarak bağıl nem tespit edilebilir [Bindon, 1965].

3.4.2. Çiğ Noktası Higrometresi

Çiğ noktası higrometresi bağıl nemi tayin etmede kullanılan en doğru metottur. Bu higrometrenin çalışma prensibi parlatılmış ve açık renkli bir yüzeyin üzerini etrafındaki havada mevcut bulunan su buharının yoğunlaşmasını sağlayacak sıcaklığa kadar soğutmaktan ibarettir. Yüzey bu sıcaklığa soğuyunca nem parlatılmış yüzey üzerine çöker ve kendini ince bir buğu tabakası şeklinde gösterir. Yüzey matlaşınca yüzeyin sıcaklığı ölçülür. Ölçülen bu sıcaklığa karşılık gelen buhar basıncı (P_v değeri) tablolardan bulunur, buradan da bağıl neme geçilir [Drigo ve Alocco, 1955].

3.4.3. Saçlı Higrometre

Çalışma prensibi bağıl nemin insan saç teli üzerindeki etkisine dayanır. İnsan saç teli bağıl neme bağlı olmak üzere uzar veya kısalır. Buradan yola çıkılarak “mekanik higrometre” olarak da adlandırılan “saçlı higrometreler” tasarlanmıştır. Bunun için birkaç saç teli yağı alındıktan sonra iki destek arasında gerdirilir. Havadaki nem miktarındaki artış ile birlikte saç tellerinin boyu orantılı olarak artar. Saç telinin uzunluğundaki bu değişimler sistemin bağlı olduğu göstergiyi hareket ettirir. Göstergenin ucu kalibre edilmiş bölmelerden ibarettir ve göstergenin durduğu yerden bağıl nem okunur (Şekil 3.5). Saçlı higrometre duyarlılığı az olan bir metot olmasına rağmen yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.



Şekil.3.5. Saçlı higrometre.
(www.answers.com/topic/hygrometer).

3.4.4. Elektriksel Direnç Higrometre

Alüminyum oksit, fenol-formaldehit polimerleri ve stiren polimerleri gibi bazı materyaller etraftaki havanın oransal nemine göre yüzey elektrik rezistansında farklılık gösterirler. Çalışma prensibi bu materyallerin havanın nemine göre meydana getirdikleri dirence dayanan bu metotta bölümlendirme yoluyla direnç, nem olarak okunabilmektedir.

3.5. Bağıl Nemin Sabitlenmesi

Bilimsel çalışmalarda bağıl nemin sabitlenmesi, bağıl nem sıcaklıktan şiddetle etkilendiğinden dolayı büyük önem taşır. Bu amaçla hem daha ekonomik, hem de daha kolay olduğundan doymuş tuz çözeltilerinden yararlanılır. Farklı konsantrasyonlardaki potasyum hidroksit, sülfürik asit ve doymuş tuz çözeltileri hazırlanarak ortamın bağıl nemi sabitlenebilir. Özel doymuş tuz çözeltileri doğru şekilde hazırlandıklarında üstlerindeki alanın nemini hep aynı değerde tutarlar. Bunun için kullanılan tuzların yüksek saflıkta olması ve muhafaza edilirken havanın neminden uzak tutulması gerekir. Doymuş tuz çözeltileri belirtilen sıcaklıklarda çözünebilecek maksimum miktarda tuz su içine katılarak aşırı doymuş çözeltilerden hazırlanır. Çözelti daha fazla tuz çözemeyecek hale geldiğinde istenilen kap içine alınır ve içine birkaç tane tuz kristali atılarak doymuş tuz çözeltisi hazırlanmış olur.

Bir katı madde su içerisinde çözündüğünde ortamın entropisi düşer. Diğer bir ifadeyle su moleküllerinin sıvı fazdan buhar fazına geçmesi zorlaşır yani buhar basıncı düşer. Buhar basıncının düşmesi, donma noktası sıcaklığında azalmaya ve kaynama noktası sıcaklığında artmaya neden olur (koligatif özellikler). İdeal çözeltilerdeki konsantrasyonla buhar basıncı arasındaki ilişkiyi veren Raoult yasasına göre ideal çözeltilerde çözücünün buhar basıncının bağıl olarak azalması katı maddenin mol fraksiyonuna eşdeğerdir (Eşitlik 3.10).

$$\frac{P}{P_0} = \frac{n_1}{n_1 + n_2} \quad (3.10)$$

Burada, “ P ” çözeltinin buhar basıncı, “ P_0 ” çözücünün buhar basıncı, “ n_1 ” katı maddenin mol sayısı ve “ n_2 ” çözücünün mol sayısıdır.

Havayla temas halinde bırakılan doymuş tuz çözeltisi havanın nemini üzerinde yoğunlaştırır ve bu yoğunlaşma ortamın buhar basıncı doymuş tuz çözeltisinin buhar basıncının altına düşene dek devam eder. Doymuş tuz çözeltisine ait buhar basıncı saf suyun sahip olduğu buhar basıncından daha düşüktür ve bu durumda doymuş tuz

çözeltisinin yüzeyinde toplanan su ancak ortamın sıcaklığında doymuş çözeltinin buhar basıncına uygun düşen bağıl nem değerinde buharlaşır.

Su aktivitesi, doymuş tuz çözeltisinin havadan suyu adsorplama eğilimi sabit sıcaklıkta dengede doymuş çözeltinin buhar basıncıyla, suyun buhar basıncının oranıdır. Su aktivitesi diğer bir terimle maddenin sabit sıcaklıkta dengeye erişmesinden sonra, madde tarafından tutulan su miktarıdır. Bu oran yüzle çarpıldığında bağıl nem elde edilir. Buhar basıncı bilinen doymuş tuz çözeltilerinin yardımıyla bağıl neme direk olarak geçilebilir. Bazı doymuş tuz çözeltilerinin buhar basınçları ve bağıl nemleri Çizelge 3.2’de verilmektedir.

Çizelge 3.2. Bazı doymuş tuz çözeltilerinin farklı sıcaklıklardaki bağıl nem değerleri [Winston and Bates, 1960].

Doymuş Tuz Çözeltileri	2°C	10°C	20°C	25°C	30°C	50°C
MgCl ₂ .6H ₂ O	35	34	33	32,5	32,5	31,5
Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	66	...	55,5	50,5	47	...
NH ₄ NO ₃	...	75	65,5	62,5	59,5	48
NaNO ₃	...	77,5	76	74	72,5	67,5
KCl	88	88	85	85	84,5	80,5
KH ₂ PO ₄	...	98	96,5	96	93,5	92,5

Ortamın bağıl neminin ayarlanmasında kullanılan bir diğer metot ise, kuru ve nemli havanın belli oranlarda karıştırılması veya belli bir doymuşluk değeri gösteren gaz akımıyla sağlanmasıdır.

4. YOĞUNLAŞMA

4.1. Yoğunlaşma (Kondensasyon) ve Çeşitleri

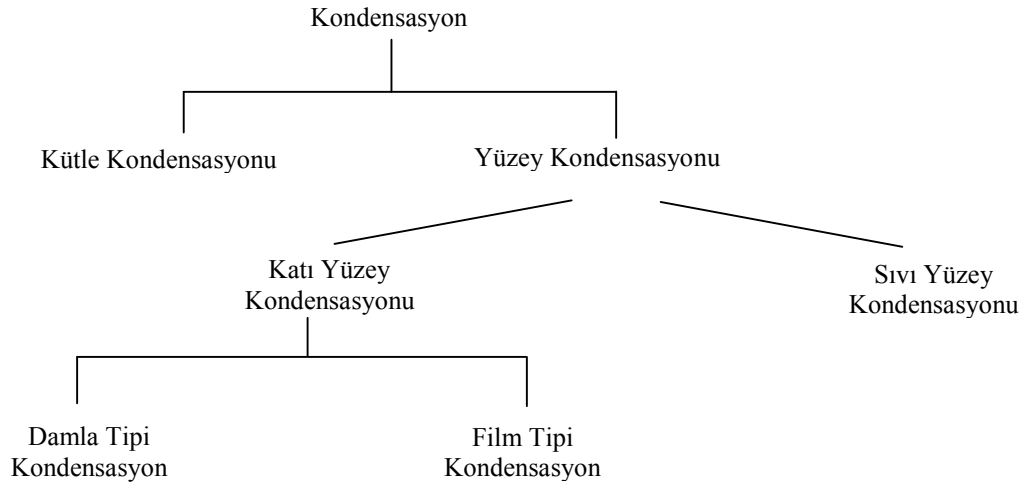
Yoğunlaşma, buharın sıvıya dönüşmesini içeren bir faz değişim prosesidir. Su buharı bağıl nemine (RH) bağlı olarak belli bir sıcaklıkta belli bir buhar basıncına sahiptir. Bu buharın sıcaklığı doygunluk sıcaklığının altına düşürüldüğünde yoğunlaşma başlar. Doğada her yerde yoğunlaşma ile sıklıkla karşılaşılabilir. Tüm dünyada birçok enerji dönüşüm sistemlerinde, kimyasal proseslerde, havalandırma sistemlerinde, otomotiv ve diğer birçok endüstride büyük önem taşır.

Buhar yoğunlaşıp sıvı faza dönüşürken açığa çıkan ısı, faz değişim süreci sırasında yoğunlaşmanın meydana geldiği ortamdan ya konveksiyonla, ya difüzyonla ya da radyasyonla uzaklaştırılmalıdır. Yoğunlaşmanın meydana geldiği bölgede bir basınç düşüşü gözlenir ve sonuç olarak buhar kütle bu bölgeye doğru difüze olur. Yoğunlaşma başlangıcı henüz tam anlamıyla tanımlanamamış olsa da bu sürecin buhar içindeki buhar moleküllerinin bulk veya bir katı yüzey üzerinde meydana getirdikleri bir çekirdekle başladığına inanılmaktadır. Kondensasyon olayı genel olarak kütle ve yüzey kondensasyonu olmak üzere iki temel sınıfta kategorize edilebilir.

Kütle kondensasyonu, buharın sıcaklığı doygunluk sıcaklığının altına düşürüldüğünde bulk buhar içinde meydana gelebilen bir kondensasyon türüdür. Bu olay homojen kondensasyon olarak adlandırılır ve bu olayın gerçekleşmesi örneğin toz gibi yabancı partiküller tarafından kolaylaştırılır. Sis oluşumu bu tip kondensasyona bir örnektir.

Yüzey kondensasyonu ise, önceden soğutulmuş ve buhara maruz kalmış bir katı yüzey üzerinde, buhar, kendisinin doygunluk sıcaklığından daha düşük sıcaklıktaki bu katı yüzeyle temas ettiğinde gerçekleşir. Kondensasyonun bu türü ısı transferi üzerinde önemli bir etkiye sahip olup, çok sayıda endüstriyel uygulamada kullanılır. Yüzey kondensasyonu, sıvı yüzeyler üzerine kondensasyon ve katı yüzeyler üzerine kondensasyon olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Katı yüzey kondensasyonu, katı bir

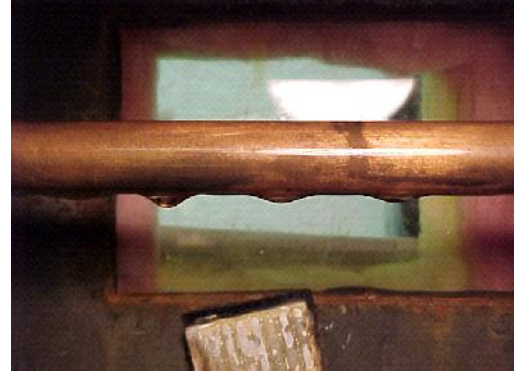
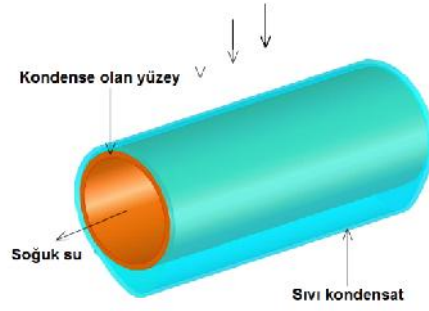
yüzey üzerinde düşük sıcaklıklarda meydana gelir. Yüzey kondensasyonunu sıvı fazın katı yüzey üzerinde oluşması olarak düşündüğümüzde “damla tipi kondensasyon” (dropwise condensation) ve “film tipi kondensasyon” (filmwise condensation) olarak ayırt edebiliriz. Kondensasyonun gerçekleşeceği yüzeyin karakteristik özelliklerine bağlı olarak bu iki tip yüzey kondensasyon türünden yalnız birisi ya da her ikisi de aynı anda meydana gelebilir (Şekil 4.1) [Hartnett and Irvine, 1991].



Şekil 4.1. Kondensasyon olayının sınıflandırılması [Hartnett and Irvine, 1991].

4.1.1. Film Tipi Yoğunlaşma

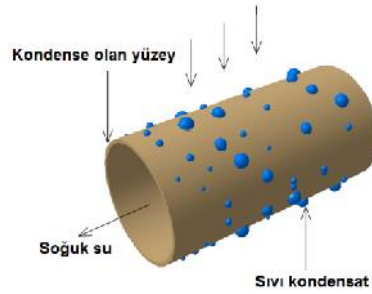
Film tipi yoğunlaşma, kondense olan sıvının kondensasyonun meydana geldiği yüzeyi tamamıyla ıslattığı durumlarda meydana gelir ve kondensasyon yüzeyi bu sıvı film tarafından tamamıyla örtülür (Şekil 4.2). Yüzeydeki bu sıvı film yerçekiminin etkisiyle yüzeyden kayarak düşer. Kondense olan sıvı filmin kalınlığı kondensasyon süresince artar ve böylece bu sıvı film ısı transferini engelleyici bir direnç ve sıcaklık gradiyenti oluşturur.



Şekil 4.2. Yatay bir tüp üzerinde meydana gelen film tipi kondensasyon [Vemuri, 2005].

4.1.2. Damla Tipi Yoğunlaşma

Damla tipi kondensasyonda kondense olan damlalar yüzeyde film kondensasyonunda olduğu gibi sürekli bir film oluşturmak yerine damlalar meydana getirirler ve yüzey farklı çaplara sahip boyutları nanometreden mikrometreye değişen çok sayıda damla ile kaplanır (Şekil 4.3).



Şekil 4.3. Yatay bir tüp üzerinde meydana gelen damla tipi kondensasyon [Vemuri, 2005].

Damla tipi kondensasyonda çekirdeklenmeye elverişli bölgelerde meydana gelen küçük damlalar difüzyonla büyürler, büyük damlalar meydana getirmek üzere birleşirler, belli bir büyüklüğe ulaştıklarında ve kondense oldukları yüzeye eğim verildiğinde arkalarında kondensasyon için temiz bir yüzey bırakarak yüzeyden yuvarlanarak ayrılırlar. Bu tip kondensasyonda yüzey sıvı bir film tabakası ile kaplanmadığından film tipi kondensasyonda olduğu gibi ısı transferini engelleyici bir

durum söz konusu değildir. Buna bağlı olarak damla tipi kondensasyonla elde edilen ısı transfer katsayıları, film tipi kondensasyonla elde edilen ısı transfer katsayılarıyla karşılaştırıldığında 10 kattan daha fazladır. Büyük ısı transfer katsayılarının elde edilmesi üreticilere küçük yüzey alanlarında belirlenen ısı transfer oranını elde etme olanağı sağlar ve burada daha küçük yüzey alanı daha ucuz kondenser demektir. Bu nedenle ısı transferine dayalı uygulamalarda damla tipi kondensasyon tercih edilir. Ancak uzun süre bozulmadan damla tipi kondensasyonu verecek yüzeyler üretmek oldukça zordur ve bu yüzeyler bir süre sonra film tipi kondensasyona dönüşürler.

Damla tipi kondensasyon kondense olan buhara damla tipi kondensasyonu tetikleyici bir kimyasal ilave edilerek, yüzeyi teflon gibi serbest yüzey enerjisi düşük polimer filmle veya altın, gümüş ve platin gibi saf mataller ile kaplayarak elde edilebilir. Çeşitli waxlar ve oleik ya da lineloik asit gibi yağ asitleri damla tipi kondensasyonu tetikleyici kimyasallar olarak değerlendirilebilirler. Ancak bu tetikleyiciler yüzeyde kirlenme, oksidasyon veya tetikleyicilerin yüzeyden bir süre sonra ayrılması gibi nedenlerden dolayı etkinliklerini bir süre sonra yitirirler. Bu tip problemleri tetikleyicinin buhara belli aralıklarla enjekte edilmesi ve yüzey kaplamasının kombine etkileri ile aşmak mümkün olabilmektedir. Damla tipi kondensasyonun etkinliğine engel olan bir diğer sebep ise damlaların kondense oldukları yüzey üzerinde birikmesidir ve biriken bu damlalar yüzünden ısı transfer oranı hızla düşer. Bu nedenle çoğu kondenser yüzeyinin film kondensasyonu verecek şekilde tasarlanmasına mecbur kalınmıştır [Hartnett and Irvine, 1991].

Damla tipi kondensasyon üzerinde etkisi olan değişkenlerin sayısı oldukça çoktur:

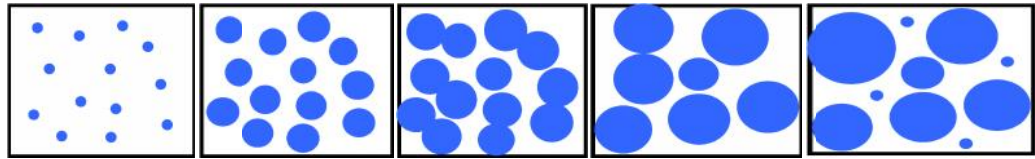
- Yüzeyin mikro özellikleri
- Yüzeydeki fonksiyonel grupların oriyantasyonu (yönelimleri)
- Yüzeyin pürüzlülüğü,
- Yüzeyin ıslatılabilirliği (temas açısı)
- Temas açısı karmaşası
- Ortamın basıncı
- Ortamın bağıl nemi
- Ortamın sıcaklığı

- Eğer denemeler kondensasyon yüzeyine buhar gönderilerek gerçekleştiriliyorsa gönderilen buharın hızı
- Kondensasyon yüzeyinin ısı iletkenliği
- Kondense olmayan gaz konsantrasyonu

Bu değişkenler arasında bilinen en önemlileridir.

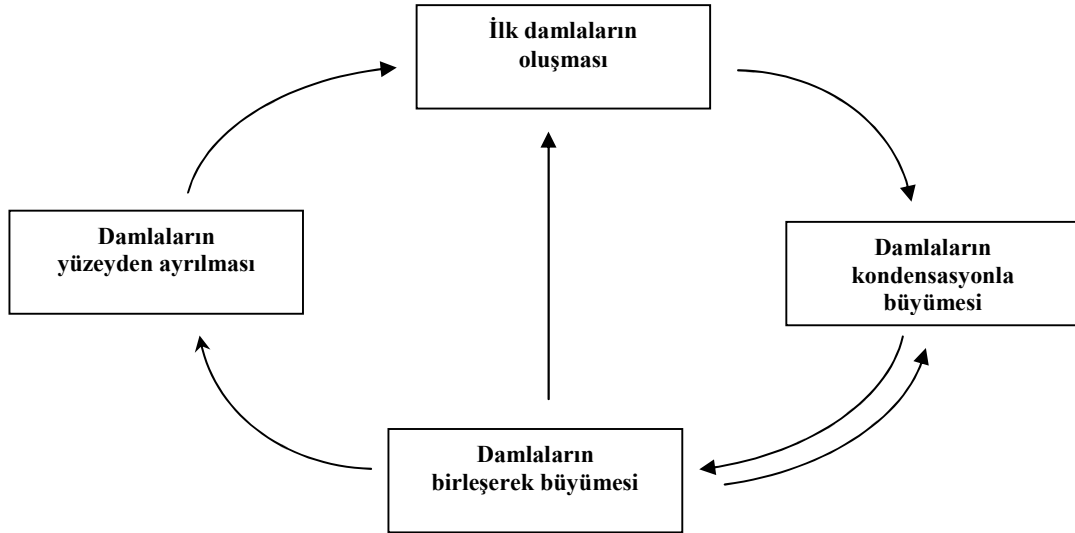
4.1.2.1. Damla Tipi Yoğunlaşmanın Mekanizması

Damla tipi kondensasyon prosesi çok sayıda prosesin bir araya gelmesiyle meydana gelir. Havada mevcut buharın doyma sıcaklığının altındaki sıcaklığa sahip yüzeye çarpmasıyla kondensasyonda açığa çıkan gizli ısıyı yayarak yüzeyde çok sayıda minik damla meydana gelir. Bu damlacıklar buharın üzerlerine direkt kondensasyonu ile büyümeye devam ederler. Bu esnada etraflarındaki komşu damlalarla aralarındaki mesafe gittikçe küçülür ve bir süre sonra damlalar birbirlerine değmeye ve daha büyük damlalar oluşturacak şekilde birleşmeye başlarlar. Her birleşmede damlalar bulundukları pozisyondan bir miktar kayarlar ve yeni kondense olacak damlalara boş alan oluştururlar. Bu sırada damlalar hem kendi üzerlerine olan doğrudan kondensasyonla ve hem de birleşmeyle büyürler. Ancak pek çoğu bu sırada hemen yakınlarındaki çok daha büyük damlalar tarafından absorbe edildiklerinden ortadan kaybolur (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Damla kondensasyonunun mekanizması [Leach et al., 2006].

Temelde damla kondensasyonu damlanın çekirdeklenmesi ile başlayan, sürekli büyümesi, rastgele birleşmesi ve sonunda damlanın yüzey üzerinden süpürülerek ayrılması ile sonlanan çevrimli bir prosestir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Kondensasyon prosesinin şematik gösterimi.

Damla tipi kondensasyonda ısı transfer katsayısının film tipi kondensasyondan daha yüksek olması (ve dolayısıyla ısı transfer performansının çok daha iyi olması) ilk olarak Schmidt ve arkadaşları tarafından 1930'da rapor edilmiştir [Schmidt et al., 1930] ve damla tipi kondensasyona olan ilginin artmasına neden olmuştur.

Damla tipi kondensasyonun mekanizmasının anlaşılabilmesi için öncelikle damla oluşumu ve büyümesinin nasıl gerçekleştiğinin bilinmesi gerekir. Jakob [1936], kondensasyon sırasında yüzeyde buhar ya da suyun ince bir tabaka halinde meydana geldiğini ve belli bir kalınlığa ulaştıktan sonra damlalar oluştuğunu ve boşalan alanda hemen yeni bir film tabakası oluştuğunu savunmuştur. Jakob'a göre kondensasyon, ısı transferine engel olmayacak derecede bu ince film tabakası üzerinde meydana geldiğinden yüksek ısı transfer katsayıları elde edilmektedir. Jakob tarafından savunulan bu görüş daha sonra bazı bilim adamları tarafından da desteklenmiştir [Baer and McKelvey, 1958; Welch and Westwater, 1961].

Farklı bir görüş olarak Tammann ve Boehme [1935], tekrarlanan kondensasyonda damlaların yüzeyde aynı düzende sıralandığını ve dolayısıyla yüzeyde belirli çekirdeklenme sitelerinin varlığını gözlemlediklerini rapor etmişlerdir. Bu gözlem McCormick ve Baer tarafından yapılan denemelerle deneysel olarak kanıtlanmıştır. McCormick ve Baer damlaların yüzeyde rastgele ve dağınık yerlerde çekirdeklendiğini, büyüdüğünü ve çekirdeklenmenin gerçekleştiği bu

yerlerin muhtemelen yüzeydeki tepeler ve çukurlar olduğunu savunmuşlardır [McCormick and Baer, 1963, 1965].

Umur ve Griffith [1965] yüzey buhar sıcaklığının altına soğutulduğunda yüzeyde herhangi bir film meydana gelmediğini göstermişlerdir. Ve ayrıca damlaların ardında kalan filmin damlaların yüzeyden ayrılması sırasında yok olmadığını, yüzeyden yuvarlanarak ayrılan damlaların arkalarında bir monotabaka bıraktığını söylemişlerdir. Bırakılan bu monotabaka asla bir film kadar kalın olmadığı gibi bu alanda kondensasyonunda gerçekleşmediğini savunmuşlardır.

Damla kondensasyonu öncelikle damlaların yüzeyde çekirdeklenmesi ile başlar ve bu damlaların bağımsız şekilde büyümeleri komşu damlalarla birleşmelerine kadar devam eder. Birleşen damlalar büyümeye devam ederken, damlaların birleşmesiyle açığa çıkan boş alanda yeni damlalar çekirdeklenmeye başlar. Bu proses devam ettikçe farklı büyüklüklerdeki damlalar arasında birleşme devam eder ve bir noktadan sonra birleşerek büyüyen damlaların büyüklükleri ve aralarındaki boşluklar uniform hale gelir. Yüzeyde belli bir eğiklik varsa yer çekiminin de etkisine dayanamayan bu damlalar yüzeyden süpürülür. Literatürdeki çoğu çalışma damla yoğunlaşmasının yüzeyde çekirdeklenme prosesiyle başladığını ve damlalar arasında herhangi bir film oluşumunun olmadığını savunmaktadır.

4.1.2.2. Damla Büyüklüğü Dağılımı

Damla kondensasyonunda yüksek magnifikasyonlarda (büyütmelerde) yapılan gözlemler kondenser yüzeylerinde kondense olan damlaların farklı büyüklüklerde olduğunu göstermektedir. Yüzeye kondense olmuş tek bir damlayı incelediğimizde damla büyüklüğünün kararlı (damla üzerine direkt kondensasyon oldukça) ve kararsız (hemen bitişiğindeki damla ile birleştiğinde) şekilde değiştiğini görürüz. Buna bağlı olarak kondenser yüzeyinin sıcaklığı değişir ve farklı büyüklüklerdeki bu damlalar kondenserin yüzey sıcaklığında iniş ve çıkışlara neden olur. Literatürde damla büyüklüğü dağılımı ortalama ısı transfer oranını hesap etmekte önem taşıdığından çoğu araştırmacı damla büyüklüğü dağılımı probleminin çözümüyle çeşitli yollar deneyerek uğraşmıştır.

Fatica ve Katz [1949] kondensasyonun olduğu alanda tüm damlaların aynı boyuta sahip olduğunu, aralarındaki boşlukların uniform olduğunu ve çekirdeklendikleri yerlerde kondensasyonla büyüdüklerini farz etmişlerdir.

Wenzel [1964] damlaların kare düzende büyüdüklerini ve damlalar arası birleşmelerin dört komşu damla arasında yeni bir kare düzen ve daha büyük bir damla oluşturacak şekilde olduğunu kabul etmiştir. Damla büyüme ve birleşmesini bilgisayarla modelleyen ilk araştırmacılar tam anlamıyla bir model geliştirebilmek için en büyük problemin uzun sürelere ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir [Gose et al., 1967; Tanasawa and Tachibana, 1970].

Rose ve Glicksman [1973] çalışmalarında damla büyüklüklerinin teorik dağılımının kondenserin belirli bir bölgesine ait olduğunu, başka bir bölgede başka bir dağılımın görülebileceğini savunmuştur. Kondenser yüzeyinin daha alçak bölgelerinde kondense olan damlalar yüzeyden çok daha sık aralıklarla süpürdüklerinden bu bölgelerde büyük damlaların oluşumu daha azdır. Kondenser yüzeyindeki damla büyüklüğünün dağılımının analizinin yapılabilmesi için büyük damlaların olduğu bölge seçilmeli ve o bölge boyunca integre edilmelidir. Ancak büyük damlaların dağılımının olduğu bölgeleri dikkate alan bu teori daha düşük yüksekliklerde meydana gelen ve yüzeyden daha sık süpürülen damlaları dikkate almamaktadır.

Le Fevre ve Rose [1966] kondense olan yüzeyin boyutları r ile r_{max} arasında değişen damlalar tarafından kaplanma fraksiyonunu bulmak için Eşitlik 4.1'i türetmişlerdir.

$$f_{co}\left(\frac{r}{r_{max}}\right) = 1 - \left(\frac{r}{r_{max}}\right)^n \quad (4.1)$$

Burada f_{co} damlalar tarafından işgal edilen alan fraksiyonu, r ise çaptır. Bu eşitlik hem damlaların süpürdüğü yüzeylerde (dikey) ve hem de süpürülmediği yüzeylerde (yatay) kullanılabilir. Süpürülme etkisi eşitliğe uygun n değerinin girilmesi ile dahil

edilebilmektedir. Tanaka çalışmalarında süpürülmenin olmadığı yüzeyler için n değerinin $1/3$ 'e yakın olduğunu göstermiştir [Tanaka, 1975].

Wu ve Maa [1976] küçük damlaların damla büyüklüğü dağılımını bulmak için popülasyon denkliği modelini kullanmıştır. Bu modelde küçük damlaların sadece direkt kondensasyonla büyüdüğü ve kararlı bir dağılıma sahip olduğunu kabul edilmiştir. Daha sonra Maa [1978] bu popülasyon denkliği modelini kondenser yüzeyinde kondense olmuş hem büyük ve hem de küçük damlalar için türetmiş ve elde ettiği eşitliği nümerik olarak çözmüştür. Ayrıca sonuçlar elde ettiği deneysel verilerle de uyumlu çıkmıştır.

Tanaka [1975, 1979], dikey kondensasyon yüzeyinde çekilmiş fotoğraflardan yola çıkarak kararlı koşullarda gerçekleşen damla kondensasyonunda yüzeydeki kondensatın damlaların yuvarlanmasıyla yüzeyden periyodik olarak süpürüldüğünü savunmuştur. Plakadan süpürülerek ayrılan bu damlaların arkalarında bıraktıkları boş şeritlerde hiç vakit kaybetmeden yeniden kondensasyon olmakta ve döngü bu şekilde devam etmektedir. Tanaka bu geçişli kondensasyon için istatistiksel ve geometrik kabullerle integral-diferansiyel denklem setleri türetmiştir. Dört boyutlu parametrelerle tanımlanan bu eşitliklerin çözümü deneysel datalarla uyumluluk göstermektedir.

4.1.2.3. Damla Yoğunlaşmasında Isı Transferi

Isı transferi sıcaklık farkı nedeniyle iki sistem veya bir sistem ile çevresi arasında meydana gelen enerji transferidir. Isı transferinin fiziki mekanizması genelde oldukça karmaşık olmakla beraber literatürde üç tür ısı transferi mekanizması tanımlanır. Bunlar kondüksiyonla, konveksiyonla ve radyasyonla ısı iletimidir. Kondüksiyonla ısı iletimi aynı katı, sıvı veya gaz ortamındaki farklı bölgeler arasında, veya doğrudan fiziki temas durumunda bulunan farklı ortamlar arasında, moleküllerin fark edilir bir yer değiştirmesi olmaksızın, moleküllerin doğrudan teması sonucunda oluşan ısı yayılımı işlemidir. Bildiğimiz üzere bir maddenin sıcaklığı bu maddeyi meydana getiren moleküllerin ortalama kinetik enerjileri ile orantılıdır (kinetik teori). Ortam içerisinde bir bölgede sıcaklığın yüksek olması o bölgedeki moleküllerin ortalama kinetik enerjilerinin yüksek olduğunu

gösterir. Ortalama kinetik enerjileri yüksek olan moleküller enerjilerinin bir kısmını ortalama kinetik enerjileri düşük olan komşu bölgedeki moleküllere iletirler. İletme işlemi sıvılarda moleküllerin birbirini takip eden çarpışmaları ile olurken, katılarda moleküllerin ve maddenin yapısını oluşturan kafeslerin titreşimi ve/veya yüksek sıcaklıktan alçak sıcaklığa serbest elektron sürüklenmesi ile olur. Genelde titreşimle olan iletim, elektron sürüklenmesi ile olan iletimin yanında ihmal edilebilir düzeyde olduğundan katılarda enerji iletiminin elektron sürüklenmesi ile olduğu var sayılabilir. Bu nedenle elektriği iyi ileten katı malzemeler ısıyı da iyi iletirler [Yüncü ve Kakaç, 1999].

Isı iletiminde genel olarak birim zamanda, birim alandan transfer edilen ısı miktarı “ q ” “ısı akısı” (W) olarak ifade edilir. Bir x yönünde meydana gelen ısı akısı “*Fourier Kanunu*” ile verilir (Eşitlik 4.2).

$$\frac{q_x}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad (4.2)$$

Burada dT sıcaklık farkı, dx sıcaklık farkının olduğu mesafe, A alan ve k ısı transfer katsayısıdır. Isı transfer katsayısının birimi (W/mK)’dir [Geankoplis, 2003].

Her maddenin kendine has bir ısı transfer katsayısı değeri vardır ve elektrik iletkenliği ile doğrudan orantılıdır. Katılar için ısı transfer katsayısı çok geniş bir aralıkta değer alır. Çizelge 4.1 bazı katı yüzeyler için ısı transfer katsayısı değerlerini vermektedir.

Çizelge 4.1. Bazı katı yüzeylere ait 25°C’deki ısı transfer katsayısı değerleri.
(www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html)

Katı Yüzey	Termal İletkenlik Katsayısı (k) (W/mK)
Bakır	401
Alüminyum	250
Pirinç	109
Paslanmaz Çelik	16
Cam	1,05
Polipropilen	0,1

Yoğunlaşma hem ısı ve hem de kütle transferi temellidir. Damla tipi yoğunlaşma ile elde edilen ısı transfer katsayıları film tipi yoğunlaşma ile elde edilenden daha fazla olması damla kondensasyonuna olan ilginin artmasına neden olmuştur. Isı transferi ile yoğunlaşma arasındaki ilk ilişki film tipi kondensasyon üzerinden üretildiğinden film tipi yoğunlaşma için çıkarılan denklemlerin bilinmesi ve daha sonra damla tipi yoğunlaşmaya uygulanması gerekir.

Film tipi kondensasyonun analitik olarak incelenmesi ilk kez Nusselt tarafından gerçekleştirilmiştir [Nusselt, 1916]. Nusselt film tipi kondensasyon problemini çözerken aşağıdaki kabulleri yapmıştır.

- Film içinde kondense olan sıvının akışı laminar akıştır.
- Sıvı özellikleri sabittir.
- Kondensatın alttan soğuması ihmal edilmiştir.
- Film boyunca meydana gelen momentum değişimleri ihmal edilmiştir.
- Buhar durgundur, kondensatın üstünden altına doğru hiçbir sürüklenme hareketi göstermez.
- Isı transferi sadece konduksiyonla meydana gelmektedir.
- Yüzey sabit sıcaklıktadır.

Nusselt bu kabullere dayanarak yatay tüp ve dikey plaka için çeşitli bağıntılar türetmiştir (Eşitlik 4.3 ve Eşitlik 4.4) [Tanasawa, 1991].

Yatay tüp için:

$$h_{yatay} = 0,729 \left(\frac{g \rho_1 (\rho_1 - \rho_v) h_{fg} k_1^3}{\mu_1 (T_{sat} - T_s) D} \right)^{1/4} \quad (4.3)$$

Dikey plaka için:

$$h_{dikey} = 0,943 \left(\frac{g \rho_1 (\rho_1 - \rho_v) h_{fg} k_1^3}{\mu_1 (T_{sat} - T_s) L} \right)^{1/4} \quad (4.4)$$

Burada, h_{fg} buharlaşma gizli ısı (J/kg), k_1 sıvının termal iletkenliği (W/m-K), ρ_1 ve ρ_v sıvının ve buharın yoğunluğu (kg/m³), μ viskozite (Ns/m²), D kondensasyonun meydana geldiği tüpün dış çapı (m), L kondensasyonun meydana geldiği plakanın uzunluğu (m), T_{sat} doyma sıcaklığı (K), T_s kondensasyon yüzeyinin sıcaklığı (K) ve g yerçekimi ivmesi (m/s²)'dir.

Daha öncede belirttiğimiz gibi damla tipi kondensasyonla film tipi kondensasyona oranla en az 10 kat daha fazla ısı transfer katsayıları elde edilmektedir. Büyük ısı transfer katsayıları daha küçük kondenser alanından daha yüksek verim almak anlamına geleceğinden endüstride damla tipi kondensasyon büyük önem taşır. Damla tipi kondensasyonda proses farklı boyutlardaki damlalar üzerinden yürüdüğünden toplam ısı transfer oranını bulmak için tek bir damla yoluyla olan ısı transfer miktarının kondensasyon yüzeyindeki çapı ve dağılımının birer fonksiyonu olarak bilinmesi gerekmektedir.

Tek bir damla yoluyla olan ısı transferini bulurken dikkat edilmesi gereken bazı önemli durumlar vardır. Bunları;

- Tek bir damla yoluyla ısı iletimi
- Kullanılan katı yüzeyindeki ısı iletimi
- Buhar-sıvı arayüzeyindeki yüzeyler arası ısı transfer katsayısının varlığı ve değişimi
- Komşu damlalardaki ısı iletiminin tek başına bir damlada olan ısı iletimine müdahalesi

şeklinde sıralayabiliriz. Damla tipi kondensasyonla sağlanan ısı transferi büyük önem taşıdığından bu proste ısı transfer oranını tahmin etmek adına önemli çalışmalar yapılmıştır.

Fatica ve Katz [1949] aynı boyutta ve eşit boşluklarla uniform olarak sıralanmış damlaların kondensasyonla büyüdüğü bir model üzerinden ısı transfer oranını tahmin etmeye çalışmışlardır. Bu model kararlı hal (steady state) temelleri üzerine kurulmuştur. Tüm damlalar aynı çaptadır ve kondense oldukları yüzey üzerinde aynı

temas açısı değerine sahiptir. Damlanın sıcaklığı ile kondensasyonun meydana geldiği yüzeyin sıcaklıkları arasındaki farkın kondensasyonu meydana getiren yürütücü kuvvet olduğunu söylemişlerdir. Isı transferinin büyük çoğunluğunun damlanın katı, sıvı ve buhar arayüzeyindeki üçlü temas çizgisinde meydana geldiğini rapor etmişlerdir [Steyer et al., 1991; Narhe et al., 2009].

Graham ve Griffith [1973] buhar sıcaklığındaki damla yüzeyindeki sıcaklığın ortadan kalktığını ve damlanın dibindeki sıcaklıkla aynı sıcaklıkta olduğunu farz etmiştir. Çalışmada ısı transfer oranını ve damla sınırları boyunca sıcaklık değişimini belirlemek için gazların kinetik teorisini temel alan bir yaklaşım kullanılmıştır. Damla kenarlarında meydana gelen ısı akışı ihmal edilirken damlanın merkezinde çok küçük miktarda ısı transfer oranı rapor edilmiştir.

Sadhal ve Plesset [1979] kullanılan katı yüzeyin termal iletkenliğinin damla kondensasyonuna etkisini katı yüzeydeki sıcaklık dağılımını veren diferansiyel denklemleri çözerek incelemişlerdir. Çalışmada damla yüzeyinde sabit bir ısı transfer katsayısı kabul edildiğinden elde edilen sonuçlar kritik büyüklüğe sahip küçük damlalar için uygulanamamıştır.

Kullanılan katı yüzeyin ısı transferine etkisi konusunda ise bilim adamları adeta ikiye bölünmüş durumdadır. Bir grup bilim adamı materyal olarak kullanılan katı yüzeyin etkisinin ısı transferinde önemli olduğunu savunurken diğer grup damla tipi kondensasyonda materyal etkisinin olmadığını savunmaktadır ve bu konuda günümüzde halen net bir sonuç ortaya koyulamamıştır. Bilim adamları damla kondensasyonunda katı yüzey etkisi olup olmadığını saptamak için farklı termal iletkenliklere sahip malzemeleri damla kondensasyonunda materyal olarak kullanmışlardır.

Tanner et al., [1965, 1965] bakır ve paslanmaz çelik yüzeyler üzerinde atmosferik basınçta buharla damla kondensasyonu meydana getirmişlerdir. Griffith ve Lee [1967], bakır, çinko ve paslanmaz çelik yüzeylerde yatay olarak damla kondensasyonunu incelemişlerdir. Wilkins ve Bromley [1973] dikey olan 5 farklı tip dikey borunun ısı transfer katsayılarını ölçmüşlerdir. Tüm bu çalışmalarda yüzeyin termal iletkenliğinin azalmasıyla deneysel ısı transfer katsayısının düştüğü tespit

edilmiştir. Diğer taraftan Aksan ve Rose [1973] bakır ve çelik yüzeylerde dikkatli bir şekilde yaptıkları ısı transfer katsayıları ölçümlerinde diğer araştırmacıların aksine ciddi bir fark görememişlerdir. Bunun arkasından Mikic ve Hannemann [1976] ile Tsuruta et al., [1991] çelikte bakıra oranla daha düşük ısı transfer katsayısı bulmayı başarmışlardır.

Wu et al., [2001] bakır, çinko, karbon çelik ve paslanmaz çelik olmak üzere termal iletkenliği farklı dört farklı yüzey üzerinde damla kondensasyonu ile ısı transferi üzerine teorik bir çalışma yapmıştır. Çalışmanın sonucunda elde edilen ısı transfer katsayılarının yüzeyin termal iletkenliğine bağlı olduğunu, damla kondensasyonuna ait ısı transfer katsayısının yüzeyin termal iletkenliğindeki artışla arttığını ve sıralamanın Bakır>Çinko>Karbon Çelik>Paslanmaz Çelik şeklinde olduğunu rapor etmişlerdir. Ayrıca bu çalışmada kondenser materyalinin termal iletkenliğinin damla kondensasyonundaki ısı transferine etkisinin sistem basıncındaki artışla arttığını da belirtmişlerdir. Bu teorik çalışmayla kondensasyonun meydana geldiği yüzeyin termal iletkenliğindeki düşüşün rezistansı arttırdığı ve damla kondensasyonu ile elde edilen ısı transfer katsayısını düşürdüğü doğrulanmıştır. Düşük termal iletkenliğe sahip test plakaları kullanıldığında buhar ve yüzey arasında çok düşük ısı farkları bulduklarından bu şartlar altında yüzey sıcaklığındaki küçük hataların ısı transfer katsayısı belirlemede büyük hatalara yol açacağını, diğer taraftan yüksek termal iletkenliğe sahip test plakaları kullanıldığında buhar ve yüzey arasındaki sıcaklık farkıda büyük olacağından yapılan hatanın ısı transfer katsayısı üzerine etkisinin küçük olacağından bahsetmişlerdir. Farklı deneysel sonuçların temel nedenini buna dayandırmışlardır.

4.2. Yüzeylere Kondensasyon

Su damlası kondensasyonu, sıcaklığı ve basıncı ile karakterize edilen homojen su buharının doymunluk sıcaklığından daha düşük sıcaklıktaki bir yüzey üzerinde bulk fazdan sıvı faza geçmesine dayanan bir faz geçişi olayıdır ve daha öncede bahsedildiği gibi yüzeyin ıslatılabilirlik özelliğine göre film tipi veya damla tipi (hidrofilik ya da hidrofobik) olarak meydana gelir. Film tipi kondensasyonda kondensat yüzeyi ıslatır ve yüzey ısı transferine engel olan bir sıvı film tabakası ile

kaplanır. Halbuki damla tipi kondensasyonda kondensat yüzeyi tamamıyla ıslatmaz ve yüzey boyutları nanometre ile mikrometre aralığında değişen çok sayıda damla ile kaplanır. Damla tipi kondensasyonda yüzeyde herhangi bir sıvı film tabakası meydana gelmediğinden ısı transferine olan direnç azalır (ısı aktarımı önemli ölçüde atar). Damla tipi kondensasyonda film tipi kondensasyondan daha yüksek ısı transfer katsayılarının elde edilmesinin temel sebebi budur ve bu sonuç damla tipi kondensasyona olan ilginin artmasına neden olmuştur. [Meakin, 1992; Beysens, 1995; Ma et al., 2000; Rose, 2002].

Kondensasyonun suyun ıslattığı hidrofilik yüzeylerde film tipi, suyun ıslatmadığı hidrofobik yüzeylerde ise damla tipi olarak meydana gelmesi temas açısı, temas açısı karmaşası, serbest yüzey enerjisi, yüzey pürüzlülüğü gibi yüzey özelliklerinin kondense olan suyun davranışında önemli bir role sahip olduğunun en belirgin göstergesidir. Bu sebeptir ki literatürde “*Breat Figures*” olarak nitelendirilen bu damlalar uzun yıllar boyunca cam yüzeylerin temizliğini ve homojenliğini test etmekte kullanılmıştır. Homojen ve temiz cam yüzeyler üzerinde yoğunlaşma film tipinde meydana gelirken, homojen olmayan ve kirli cam yüzeylerde bu kısımlar adeta birer çekirdek olarak vazife görmüş ve damla tipi kondensasyon meydana gelmiştir. Buradan cam yüzeylerin kalitesi tespit edilebilmiştir.

Endüstride kullanılan kondenser yüzeyler genellikle metalden yapıldığından öncelikli olarak metal yüzeyler üzerinde buhar kondensasyonunun incelenmesine önem verilmiştir. Ancak metal yüzeyler çok yüksek serbest yüzey enerjisi değerlerine sahip olduklarından damla tipi kondensasyondan ziyade film tipi kondensasyon verir ve damla tipi kondensasyon verebilmeleri için yüzeylerinin modifiye edilmesi gerekir. Bu nedenle metal yüzeylerinin üzerlerinin “*promoters*” olarak nitelendirilen damla kondensasyonunu arttırıcı polimerik ya da organik kaplamalarla kaplanması yoluna gidilmiştir [McCormick and Westwater, 1965; Stylianou and Rose, 1980; Rausch et al., 2008].

4.2.1. Kondensasyon ile Yüzeyde Damlacık Oluşumu ve Yüzey Kaplama Oranı

Yüzeylerde meydana gelen kondensasyonu ısı transferi açısından inceleyen çalışmaların yanı sıra, kondensasyonla meydana gelen damlaları optik mikroskop aracılığı ile yüksek magnifikasyonlarda inceleyen çalışmalarda mevcuttur. Bu çalışmalar daha ziyade damla kondensasyonunun oluşum mekanizması ve kondense oldukları yüzeyin özellikleri ile ilişkilendirilmesi temellidir.

Damla tipi kondensasyon esasında tek başına bir proses olmayıp birkaç prosesin birleşiminden meydana gelir. İlk olarak su buharının kendi sıcaklığından daha düşük bir yüzey üzerine çarpması ile kondensasyon sırasında açığa çıkan gizli ısı yayılarak yüzey üzerinde çok sayıda minik damlacık meydana gelir. Bu damlalar su buharının üzerlerine direkt kondensasyonu ile hızlı bir şekilde büyürler. Bu büyüme sırasında belli büyüklüğe ulaşanlar birbirlerine değer ve daha büyük damlalar oluşturmak üzere birleşirler. Birleşme sırasında bu damlalar ilk pozisyonlarından çok az kayarlar ve geride bıraktıkları temiz alan yeni damlaların kondensasyonu için kullanılır. Bu aşamada damlalar hem direkt kondensasyonla ve hem de damlaların birleşmesi ile büyümeye devam ederler ve büyük çoğunluğu kendilerinden daha büyük komşu damlalar tarafından absorblanır. Eğer yüzeye belli bir eğim verilecek olursa belli büyüklüğe ulaşan damlalar yüzeyden kayarak ayrılır ve yerlerinde yeni damlaların kondense olması için boş alan kalır. Çalışmalarda çekirdeklenme, direkt kondensasyonla büyüme ve birleşme adımları genellikle bir arada rapor edilir. Damla kondensasyonu ile meydana gelen damlaların büyümelerini kantitatif olarak analiz edebilmek için çoğunlukla optik mikroskop kullanılır [Beysens and Knobler, 1986; Beysens, 1995; Beysens, 2006].

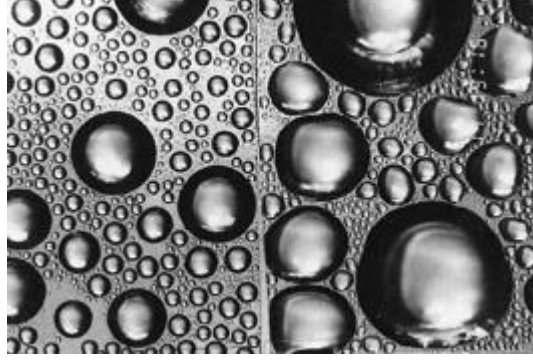
Yoğunlaşma ile meydana gelen damlalar yüzeyde belirli bir alan işgal ederler. Damlaların yüzeyde kapladığı alan yoğunlaşan sıvının *yüzey kaplama oranı (surface coverage)* olarak tanımlanır ve damlaların kapladığı yüzey alanı toplamının damlaların olduğu yüzeyin alanına oranıdır (Eşitlik 4.5).

$$Yüzey\ Kaplama\ Oranı = \left(\frac{Damlaların\ Toplam\ Yüzey\ Alanı}{Toplam\ Süstrat\ Alanı} \right) \quad (4.5)$$

Yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranı yüzeyin özelliklerine bağlıdır. Kondensasyon, damlaların bireysel olarak büyümesi ve birbirleriyle birleşmesi ile meydana geldiğinden, damlalar büyüdükçe ve çekirdeklendikçe yüzey kaplama oranı artarken, damlalar birleştikçe yüzey kaplama oranı azalır [Beysens et al., 1991]. Literatürde, histeresisin olmadığı yüzeylerde bu iki proses (büyüme ve birleşme) arasında dengeye ulaşıldığında, ortalama yüzey kaplama oranının sadece sistemin boyutlarına bağlı sabit bir değere ulaştığı tespit edilmiş olup, bu değer 2 boyutlu bir katı yüzey üzerindeki 3 boyutlu damlalar için 0,50-0,55 (%50-%55) olarak rapor edilmiştir [Fritter et al., 1991; Briscoe and Galvin, 1991; Briscoe and Galvin, 1991; Zhao and Beysens, 1995]. Bu proses boyunca damlaların büyüklüğü birkaç μm 'den yaklaşık 300 μm 'ye kadar değişmektedir [Leach et al., 2006].

Literatürde damla kondensasyonu ile yüzey kaplama oranı çoğunlukla silanlanmış cam [Beysens and Knobler, 1986; Fritter, et al., 1991; Sikarwar, et al., 2011], polimer [Briscoe, and Galvin, 1991; Briscoe and Galvin, 1991; Leach et al., 2006] ve desenlenmiş süperhidrofobik model yüzeylerde [Narhe and Beysens, 2007; Boreyko and Chen, 2009; Wier and McCarty, 2006; Narhe and Beysens, 2006; Chen et al., 2007; Dorrer and Ruhe, 2007; Dorrer and Ruhe, 2008; Dorrer and Ruhe, 2008; Varanasi et al., 2009] incelenmiştir.

Damlaların yüzey kaplama oranı katı yüzeyin yüzey özellikleri ile yakından ilgilidir. Temas açısı [Zhao and Beysens, 1995; Leach et al., 2006; Sikarwar et al., 2011], temas açısı karmaşası, [Neumann et al., 1978; Zhao and Beysens, 1995; Sikarwar et al., 2011], serbest yüzey enerjisi, [Marto et al., 1986; Holden et al., 1987; Ma et al., 2002; Rose, 2004; Lan et al., 2009; Lan et al., 2010] ve yüzey pürüzlülüğü [McCormic and Westwater, 1965] kondensasyon sırasında damlaların yüzeyi kaplama oranını en çok etkileyen yüzey parametrelerdir. Şekil 4.6, bir polietilen yüzeyi kaplayan damlaları göstermektedir.



Şekil 4.6. Polietilen yüzeyi kaplayan damlalar [Briscoe et al., 2005].

Briscoe ve Galvin [1991] temas açısı karmaşası 17° olan polietilen yüzey üzerinde damla tipi kondensasyonu incelemişler ve elde ettikleri sonuçların Vincent tarafından önerilen ve yine kendileri tarafından türetilen yarı-ampirik eşitlikle oldukça uyumlu olduğunu göstermişlerdir. *Vincent eşitliği* olarak anılan bu eşitlik (Eşitlik 4.6) damlaların yüzey kaplama oranı ile birim alan başına kondense olan damla sayısını vermektedir [Vincent, 1971].

$$\frac{(\alpha_e - \alpha)}{(\alpha_e - \alpha_o)} = \frac{N}{N_o} \quad (4.6)$$

Bu eşitlikte α herhangi bir zamandaki yüzey kaplama oranını, α_o başlangıçtaki yüzey kaplama oranını, α_e dengedeki yüzey kaplama oranını, N birim alan başına kondense olan damlaların sayısını ve N_o ise birim alan başına kondense olan damlaların ilk andaki sayısını vermektedir.

Briscoe ve Galvin [1991] ayrıca damlaların iki farklı büyüme yasasına göre büyüdüklerini rapor etmişlerdir. İlk büyüme rejimine göre kondensasyonun başlangıcında su damlaları izole damlalar gibi davranırlar. Damla birleşmesi çok nadir olduğundan damla büyüme hızına etkisi de çok azdır. Damlaların büyüme hızı paylaşılan gizli ısı ile limitlidir. İkinci büyüme rejiminde ise damla birleşmesinin damla büyüme hızına etkisi maksimumdur, açığa çıkan gizli ısı damlalar arasında kolaylıkla paylaşılır. Briscoe ve Galvin çalışmalarında ilk rejime uyan damlaların çaplarının $[D \propto \text{zaman}^{1/3}]$, ikinci rejimde büyüyen damlaların çaplarının ise $[D \propto \text{zaman}]$ şeklinde arttığını rapor etmişlerdir.

Leach ve arkadaşları 30 μm kalınlığındaki hidrofobik poliviniliden klorür (Saran) ve silanlanmış cam üzerinde atmosferik ortamda damla tipi kondensasyon gözlemlemişlerdir. Damlaların büyüme kinetiğinin de incelendiği bu çalışmada kondense olan küçük damlaların birim alan başına kondensasyon sayısının büyük damlalara nazaran daha yüksek olduğu sonucuna varmışlardır. Buna bağlı olarakta küçük damlaların yüzey kaplama oranı ve dolayısıyla ısı transferinide arttırdığını rapor etmişlerdir [Leach et al., 2006].

Literatürde soğuk bir yüzey üzerine kondense olan damlaların oluşturduğu dizilişlerin incelendiği çalışmalarda mevcuttur [Lopez et al., 1993; Kumar and Whitesides, 1994; Schafle, et al., 2003]. Eğer kondensasyonun gerçekleştiği yüzey fiziksel özellikleri açısından heterojense (özellikle serbest yüzey enerjisi açısından), kondensasyon meydana geldiğinde damlaların dizilimi sonucunda oluşan desen yüzeyin heterojenliğini bir nevi yansıtır. Kondensasyon figürleride dediğimiz su damlalarının bu dağılımı optik mikroskop altında incelendiğinde elde edilen görüntülerle yüzeyin moleküler yapısı arasında bağlantı kurulabilir. Lopez et al. [1993] bu kapsamda bir çalışma yürütülmüştür. Cam üstünde monotabaka alkantiyol kaplı altın ve alkilsiloksan kaplı SAM yüzeylerde meydana gelen kondensasyon figürlerinin yüzeyi karakterize etmekteki faydalarından bahsetmişlerdir. Kumar ve Whitesides [1994] mikrometre boyutta hidrofilik ve hidrofobik bölgeler içeren desenlenmiş heterojen yüzeyler, altın yüzeyler üzerine alkantiyol monotabaka kaplanmasıyla sağlanmış ve meydana gelen kondensasyon figürlerinin reflektivitesi değiştirilen desenlenmiş yüzeylerde meydana gelen değişikliği algılayacak optik sensörlerin geliştirilmesinde kullanılabileceği sonucuna varılmıştır. Ayrıca bu kondensasyon figürlerinin damla çekirdeklenmesi, yüzeylerin temas açısı karmaşası gibi konularda da kullanılabileceğinden bahsetmişlerdir.

4.2.2. Damla Kondensasyonu ile Su Toplanması

Literatürde kondensasyon çalışmaları sadece ısı iletim performansının artırılmasında değil, aynı zamanda havanın neminden su üretimi çalışmalarında da kullanılmaktadır. Havadaki su buharının geri dönüşüm çalışmaları yüz yılı aşkın bir

süredir çalışılmaktadır. 22 ülkede mevcut nem toplama ünitesi bu amaca hizmet etmektedir.

Bu amaçla Vargas et al. [1998], TiO_2 ve BaSO_4 tanecikleri içeren 390 μm kalınlığında polietilen kullanmışlar, 1,44 m^2 toplama yüzeyinde bir ayda m^2 başına 1,43 litre su toplamışlardır. Vargas et al. [1998] yapmış oldukları bu çalışmanın sonunda kuru mevsimlerde kondensasyonla önemli miktarlarda su üretilbileceğini ancak bunun yağmurla biriken su kadar fazla olamayacağını, buna rağmen kurak bölgeler için hayati önem taşıyan bir su kaynağı olduğunu vurgulamışlardır.

Beysens [2006] ve Beysens et al. [2006], Vargas et al. [1998] tarafından yapılan çalışmadan etkilenerek ve aynı materyali kullanarak dünyada çeşitli bölgelere kondenserler kurmuşlar ve kayda değer miktarlarda su toplanabileceğini ve bu suyun genel olarak içilebilir olduğunu rapor etmişlerdir (Şekil 4.7). Ancak bu işin tam olarak endüstriyel anlamda yapılabilmesi için yeni ve pahalı olmayan materyallere ihtiyaç olduğunu da belirtmişlerdir. Ve bu katı yüzeylerin ıslatılabilirlik özelliği bir takım yüzey muameleleri ile modifiye edilebilmektedir. Bu açıdan bir avantaj getirdiği gibi aynı zamanda zahmetli bir iştir. Çünkü kirlilik bir katı yüzeyin ıslanma özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilir.

Dünyanın en az yağmur alan bölgelerinden birisi olarak bilinen Atlantik okyanusu kıyısındaki Namib çölünde, yağın yağmur yüksek sıcaklıktan dolayı hemen buharlaşarak havaya karışır. Namib çölündeki tek nem kaynağı sabahın erken saatlerinde Atlantik üzerinden esen rüzgârdır. Burada yaşayan küçük çöl böceği olarak ta bilinen Stenocara'nın toprağın bir damla suya hasret olduğu bu aşırı sıcak zamanlarda hayatını devam ettirmesindeki mükemmellik bilim adamlarının dikkatini çekmiştir. Çöl böceği sabahın erken saatlerinde bir kum tepesiğinin üzerinde kanatları rüzgâra 45 derece açıyla bakacak şekilde durur ve nemli rüzgârın esmesini bekler. Rüzgârın hızıyla da normalden daha küçük hale gelen küçük su damlacıkları çöl böceğinin kanatlarındaki yumrular üzerinde toplanmaya başlar. Biriken su damlacıkları belirli bir büyüklüğe ulaştınca yer çekiminin etkisiyle aşağı doğru hızla yuvarlanıp çöl böceğinin ağzına düşerler. Böylece böcek susuz kalmamış olur (Şekil 4.7).



Şekil 4.7. Çöl böceği (Stenecora) ve literatürdeki su toplama çalışmaları [Beysens, 2006].
(<http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=combined-effects-water-harvesting>)

Bilim adamlarını hayretler içerisinde bırakan çöl böceğinin yapısı ilk kez Andrew Parker ve Chris Lawrence tarafından 2001 yılında dünyaca ünlü Nature dergisinde yayımlanarak ortaya çıkarıldı. Parker ve Lawrence [2001], çöl böceğinin kanatlarının süperhidrofobik yumrular ve bu yumrular üzerinde bulunan süperhidrofilik tepeler olmak üzere işlevsel olarak iki farklı yapı barındırmakta olduğunu rapor etti.

Sabah saatlerinde okyanus üzerinden esen nemli rüzgâr içerisindeki küçük su damlacıkları suyu seven çukurlarda toplanıp 4-5 mm çapına sahip büyük damlalar haline geldiklerinde yerçekiminin de etkisiyle süperhidrofobik oluklardan yuvarlanarak böceğin ağzına düşerler. Eğer oluklar süperhidrofobik olmasaydı su aşağıya doğru ilerlerken rüzgârında etkisiyle başka bir yöne yönlenebilir ya da sıcaklığın etkisiyle buharlaşabilirdi. Bilim adamları süperhidrofobik ve süperhidrofilik yapıların Stenocara'nın yüzeyindeki dizilişe benzer bir düzenlemeyle elde edilecek yüzeylerde verimli ve ucuz bir su toplama yöntemi geliştirmenin mümkün olabileceğini düşünmekte ve bu konuda son yıllarda ciddi çalışmalar yapmaktadır [Zhai et al., 2006; Zheng et al., 2010].

Zhai et al. [2006], çöl böceğinin yapısını taklit etmek için bir polielektrolitin su/2-propanol çözeltileri ile süperhidrofobik yüzeyler üzerinde hidrofilik desenler oluşturmuşlar, bu kaplamaların sadece su toplama denemelerinde değil, aynı

zamanda micropipeting ve microcontact printing alanlarında da kullanılabileceğini rapor etmişlerdir. Zheng et al. [2010], çalışmasında örümcek derisi taklit edilmeye çalışılmış ve bunun üzerinde kondensasyon denemeleri gerçekleştirilmiştir.

Bu konuda yapılan çalışmalardan çıkarılan en önemli sonuç ise bu işin çok sayıda parametre tarafından kontrol edildiğidir. Bu parametrelerden en önde gelen iki tanesi *sıcaklık ve katı yüzeyin ıslatma özellikleridir*. Bu iki parametrenin öncelikle damlanın çekirdeklenme hızını ve sonrasında da damlanın büyümesini direkt etkilediğini savunulmaktadır. Kondensasyon çalışmaları bir yüzeyin ıslatma karakteristikleri ile yakından ilgilidir. Kondense olan suyun verimini arttırmak için uzun süre dayanıklı, bozulmadan kalabilen ve ucuz polimerik malzemelerle kaplı yüzeylerin geliştirilmesine ihtiyaç vardır.

4.2.3. Polimer Olmayan Yüzeylerde Damla Yoğunlaşmasının Arttırılması

Damla tipi yoğunlaşmada film tipi yoğunlaşmada olduğundan daha yüksek ısı transfer katsayıları elde edilebiliyor olmasına rağmen, endüstride kullanılan ticari metallerin yapısının hidrofilik karakterde olması damla yoğunlaşmasının uygulamalarında engel teşkil etmiştir. Yoğunlaşan buhar metal yüzeylerin büyük çoğunluğunda film tipi yoğunlaşma meydana getirmektedir. Diğer taraftan uzun süre bozulmadan devam eden damla tipi kondensasyon elde etmek oldukça zor bir iştir. Çünkü elde edilen bu damla tipi kondensasyon bir süre sonra film tipi kondensasyona dönüşebilmektedir. Bu nedenle metal yüzeyler damla tipi kondensasyonu destekleyecek türde modifiye edilmelidir. Metal yüzeyleri damla kondensasyonu verecek şekilde hidrofobik hale getirebilmek için uygulanabilecek alternatiflerden bazıları aşağıda verilmiştir.

- Kondensasyonun meydana geldiği yüzeyi oleik asit ya da wax gibi uygun bir organik tetikleyici ile kaplamak.
- Kondensasyonun meydana geldiği yüzey üzerine kondense olan buhar içine damla tipi kondensasyonu tetikleyici hidrofobik kimyasallar enjekte etmek.

- Kondensasyonun meydana geldiği yüzeyi metal sülfür gibi inorganik bir bileşiğin ince tabakası ile kaplamak.
- Kondensasyonun meydana geldiği yüzeyi krom ya da altın ve gümüş gibi soy metallerle kaplamak.
- Kondensasyonun meydana geldiği yüzeyi düşük serbest yüzey enerjisine sahip polimerlerle kaplamak [Kandlikar, 1999].

Damla tipi kondensasyonun kimyasal tetikleyiciler kullanılarak meydana getirilmesi bir dezavantaja sahiptir çünkü uzun ömürlü olmamaktadırlar ve belli aralıklarla bu kimyasalın kondenser yüzeyine veya kondense olan buhar içine enjekte edilmesini gerektirmektedirler. Diğer taraftan bu tetikleyici meydana gelen damla tipi kondensasyonla yüzeyden süpürüldükçe sonunda film tipi kondensasyona dönüşmektedir. Başka bir alternatif olan oleik asit gibi yağ asitlerinin kondensasyonun meydana geldiği yüzey üzerine kaplanması sırasında bu yağ asitleri yüzeyde birikip ya da aglomere olup damla tipi kondensasyonu zayıflatmaktadır. Mesela oleik asitin fazlası kondensasyonun meydana geldiği yüzey üzerinde jelatinimsi bir emülsiyon tabakası meydana getirdiğinden meydana gelen efektif ısı transferine engel olmaktadır [Fatica, 1949].

Erb ve Thelen [1966], metal sülfid gibi inorganik bileşikler damla kondensasyonunda kaplama olarak denemek için çok sayıda sülfürlenmiş metal yüzeyi kullanmışlar ve yumuşak çelik yüzeyler üzerine kapladıkları sülfürlenmiş gümüş yüzeylerin 10,000 saat ve üzerinde efektif damla kondensasyonu verdiğini rapor etmişlerdir.

Damla tipi kondensasyon elde etmek için kondensasyon yüzeyinin altın ve gümüş gibi kalıcı kaplamalarla kaplanması bu metaller nispeten yüksek serbest yüzey enerjisi değerlerine sahip olmalarına rağmen devamlılığı olan mükemmel bir damla tipi kondensasyon meydana getirmektedir. Özellikle altın organikleri üzerine çekme yeteneğine sahip olduğundan yüzeyi hidrofobik hale getirebilme yeteneğine sahiptir. Bu nedenle de altın tek başına tetikleyici olarak görev görmektedir. Erb ve Thelen [1966], Woodruff ve Westwater [1979, 1981], altın, gümüş, rodyum, paladyum, krom ve platin gibi soy metal kaplı yüzeylerin damla kondensasyonundaki etkinliğini incelediklerinde altın ve gümüşün çok iyi damla kondensasyonu verdiğini

görmüşlerdir. Soy metaller yüksek serbest yüzey enerjisine sahip olmalarından dolayı su tarafından tamamıyla ıslatılırlar. Fakat karbonlu maddelerle kontamine olduklarında özellikle altın kaplı yüzeyler derece derece hidrofobik hale gelir ve çok iyi damla tipi kondensasyon verir. Soy metallerin bu alanda kullanımının tek dezavantajı bu yüzelerin üretiminin oldukça pahalıya mal olmasıdır.

Kondensasyonun meydana geldiği yüzeyi bu tip soy metallerle kaplamanın yanı sıra düşük serbest yüzey enerjisine sahip polimerlerle kaplamakta damla tipi kondensasyonun elde edilmesinde alternatif bir yöntemdir. Ayrıca maliyeti de düşüktür. Ancak kaplama yapmak başlı başına kritik bir prosestir. Çünkü çok ince kaplama yaptığınızda kondensasyon sırasında kaplanan materyal bir süre sonra aşınabilmektedir. Çok kalın kaplama yaptığınızda ise kaplanan bu kalın film dayanıklılık göstermesine rağmen ısı transferine engel olan bir rezistans görevi görmeye başlamaktadır. Dolayısıyla kaplama yaparken kaplama kalınlığını optimize etmek ayrıca önem taşıyan bir iştir ve bu prosesin efektif olarak işlemesi için oldukça dikkatli olunmasını gerektirir.

4.2.4. Polimer Yüzeylerde Damla Yoğunlaşmasına Polimer Cinsinin Etkisi

Kondensasyonun meydana geldiği yüzeyi düşük serbest yüzey enerjisine sahip polimerlerle kaplamak damla kondensasyonunun arttırılmasında etkili ve efektif bir metottur. Literatürde polimer yüzeylerin damla kondensasyonuna etkisini inceleyen çalışmalar vardır.

Marto et al. [1986], floroakrilik kaplama kullanarak yürüttükleri kondensasyon denemelerinde film tipi kondensasyonla kıyaslandığında ısı transfer katsayısını 3-6 kat arasında arttırmayı başarmışlardır. Bu çalışmada yapılan kaplamanın kalınlığını 1 mikrometre olarak kullanmışlar ve bunun ne kadar ince olursa o kadar iyi ısı transferinin olacağından bahsetmişlerdir. Organik kaplama kullanılarak gerçekleştirilen damla tipi kondensasyonun uzun süreli ve verimli olabilmesinin kullanılan materyalin moleküler yapısına, kalınlığına, yüzey pürüzlülüğüne ve katı yüzey olarak kullanılan metalin kimyasal aktivitesine bağlı olduğunu

vurgulamışlardır. Katı yüzey olarak pürüzlü ve kimyasal olarak inaktif (paslanmaz çelik veya titanyum gibi) bir materyalin kullanılmasının kaplamanın adezyonunu arttıracaklarını belirtmişlerdir.

Holden et al. [1987], tarafından yürütülen çalışmada ise toplam 14 polimer kaplamanın damla tipi kondensasyonu arttırmadaki etkinliği incelenmiştir. Çalışmada kullanılan kaplamalardan 9 tanesi florlu polimer, 4 tanesi hidrokarbon ve 1 tanesi silikon kaplamadır. Kaplamalar yaklaşık 1 mm kalınlığındaki pirinç, bakır, bakır-nikel ve titanyum üzerine kaplanmıştır. Öncelikle organik kaplama kullanılmasının damla tipi kondensasyonu arttırdığı, dolayısıyla ısı transfer katsayısını da arttırdığını (5-10 kat) rapor etmişlerdir. Hidrofobik karakteristikleri ve uygulama kolaylıkları açısından ve ayrıca 1 μm 'nin altında ultra incelikte kaplanabilme olanağı sağlayan floroepoksi ve floroakriliklerin uzun süreli aplikasyonlarda (4000 saat) oldukça iyi sonuç verdiğini rapor etmişlerdir.

Poliviniliden klorür kaplamaların kalınlığının damla tipi kondensasyon üzerine etkisi içerikli çalışma ise Haraguchi et al. [1991], tarafından bakır blok üzerinde 4 farklı kalınlık (0,05, 0,10, 0,25 ve 0,50 μm) kaplanarak yürütülmüştür. Her bir kalınlıktaki kaplama 83 saat kondensasyona tabi tutulmuştur. En iyi sonucu 0,05 μm kalınlığındaki en ince poliviniliden klorür kaplamanın verdiğini, damla tipi kondensasyonun hakim olduğu bu çalışmada elde edilen ısı transfer katsayılarının film tipi kondensasyonla elde edilenlere oranla 20 kat daha fazla olduğu ispatlanmıştır. Ayrıca bu polimerik filmin ucuz olması açısından da endüstriyel olarak kullanılabileceğinin altı çizilmiştir.

Atmosferik basınç altında damla tipi kondensasyon üzerine polimer filmin proses koşullarının etkisini incelemek amacıyla Ma et al. [2002] pirinç, bakır, paslanmaz çelik, karbon çelik tüplerin dış yüzeyine farklı proses koşullarında politetrafloroetilen (PTFE) film kaplamış ve en iyi sonucu, gösterdiği en iyi ısı transferi performansı ile pirinç tüp üzerindeki kaplamalar vermiştir. Yüzey proses koşullarının polimer film ve metal yüzey arasındaki adezyonu sağlamak için son derece önemli olduğunu, katı yüzey malzemesi olarak farklı bir materyal kullanıldığında buna uygun bir proses koşulu optimizasyonu gerekeceğini ve

bununda kondensasyonla farklı ısı transfer karakteristiklerine yol açacağını belirtmişlerdir.

Das et al. [2000], buharın damla tipi kondensasyonu arttırmak için çeşitli tüp yüzeyler üzerine kendiliğinden sıralanmış (self assembly) alkantiyol monotabaka kaplama kullanarak film kondensasyonuna nazaran oldukça yüksek ısı transfer katsayısı elde etmişlerdir. Kendiliğinden sıralanmış monotabaka kaplamaların ısı transfer katsayısını altın kaplı alüminyum için 4 kat, bakır kaplı bakır-nikel tüpler için 5 kat arttırdığını rapor etmişler ancak kaplamanın dayanıklılığını test etmemişlerdir.

Yakın zaman ait yapılan çalışmalardan biride Bansal et al. [2009], tarafından polietilen üzerinde suyun damla tipi kondensasyonunun incelenmesi ve ısı transferinin ölçülmesi üzerinedir. Burada sıcaklık profilinin tespiti için sıvı kristal kromatografisinden yararlanılmıştır. Hidrofobik karakterdeki PE film üzerinde 0,4 ile 2°C arasında yapılan soğutmalarda soğutma arttırıldığında damla tipi kondensasyonun arttığı ve dolayısıyla ortalama ısı transfer hızının da arttığı rapor edilmiştir.

Yine polimer yüzeylerle yapılan çalışmalardan olan, pürüzlü ve pürüzsüz iki farklı florosilan yüzey üzerindeki çiğlenme noktasında gerçekleştirilen damla kondensasyonunda Fruta et al. [2010], yüzey sıcaklığını düşürdükçe yüzeylerin sahip oldukları temas açısı değerlerinin de düştüğünü rapor etmişlerdir. Tam çiğlenme noktasında temas açılarının sıcaklığa bağlılığında bir dönüm noktası (inflection point) olduğunu savunmuşlardır. Temas açısındaki bu düşüş, pürüzlü yüzeyde Cassie rejiminden Wenzel rejimine geçiş olarak yorumlanmıştır.

4.2.4.1. Damla Kondensasyonuna Serbest Yüzey Enerjisinin Etkisi

Temas açısı ölçümleri spesifik bir katı yüzey üzerinde meydana gelecek olan kondensasyon biçimini önceden tahmin etmede kullanılabilecek bir ölçüm tekniğidir. Bununla birlikte atmosfere açık ortamda oda sıcaklığında ölçülen denge temas açısının, içerisinde kütle transferinin yer aldığı sistemlerin ıslatılabilirliğinin belirlenmesinde yetersiz kaldığı da tartışılmaktadır. Örneğin atmosferik basınçtaki

kondensasyon koşulları altında Politetrafloroetilen (PTFE) yüzeyi üzerindeki su temas açısı 88° iken oda sıcaklığında normal şartlardaki temas açısı ise 108° 'dir [Ponter, 1992]. Bu fark kondensat serbest yüzey enerjilerinin farklı ölçüm sıcaklıklarında farklı olmasından kaynaklanmaktadır.

Bunun üzerine 1994 yılından sonra kondensasyona serbest yüzey enerjisi kriteri getirilmiştir. Serbest yüzey enerjisi farkı, kondensasyon sıcaklığındaki kondensat sıvısının sahip olduğu serbest yüzey enerjisi ile katı yüzeyin serbest yüzey enerjisi arasındaki fark " $\Delta\gamma = \gamma_1 - \gamma_s$ " olarak ifade edilir. Burada γ_1 ve γ_s sırasıyla sıvı ve katının serbest yüzey enerjileridir. Bu farkın belirlenmesi ile katı bir yüzey üzerinde film tipi ya da damla tipi kondensasyonun meydana geleceğine dair fikir yürütülebilmektedir [Ma, 1994].

Ma [1994], kriterine göre kondensasyonun meydana geldiği yüzeyin serbest yüzey enerjisi ile kondense olan sıvının serbest yüzey enerjisi farkı sıfıra eşit veya sıfırdan küçükse kondensasyon film tipinde meydana gelmekte ve yüzey bir sıvı film tabakası ile kaplanmaktadır. Bu fark $33,3 \text{ mJ/m}^2$ 'den büyük ve yüzeyin temas açısı 90° 'den büyükse damla tipinde, fark sıfır ile $33,3 \text{ mJ/m}^2$ arasında ise ve temas açısı da 0 ile 90° arasında ise film ve damla tipi karışık olarak meydana gelmektedir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. Kondensasyon Kriteri [Ma, 1994].

Serbest Yüzey Enerjisi Farkı, $\Delta\gamma (\text{mJ/m}^2)$	Temas Açısı, θ	Kondensasyon Tipi
$\Delta\gamma \leq 0$	-	Film Tipi
$0 \leq \Delta\gamma < 33,3$	$0^\circ \leq \theta < 90^\circ$	Karışık
$\Delta\gamma \geq 33,3$	$\theta \geq 90^\circ$	Damla Tipi

Lan et al. [2009, 2010], serbest yüzey enerjisi ve nano özelliklerin damla yoğunlaşması üzerine etkisini incelemişlerdir. Yüzey olarak bakır yüzeyine nanoyapılı ve nanoyapı olmayacak şekilde n-oktadesilmerkaptan kaplanan yüzeyler kullanmış ve nanoyapılı yüzeyin damla yoğunlaşması dolayısı ile ısı aktarımına

nanoyapıya sahip olmayan yüzeye kıyasla arttırıcı bir etki göstermediğini görmüşlerdir. Tek başına nanoyapı etkisi yerine nanoyapı ve serbest yüzey enerjisinin birlikte damla yoğunlaşması ve ısı aktarımına etkisi olduğu düşünülmüş, serbest yüzey enerjisi farkı yoğunlaşan madde ile yoğunlaştığı yüzey arasındaki serbest yüzey enerjisi arasındaki farkı olarak tanımlanarak nano yapıları yüzeyin serbest yüzey enerjisi farkının nanoyapılı olmayan yüzeyden daha küçük, dolayısı ile de ısı aktarım katsayısının daha az olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Daha önce polimer yüzeylerde damla yoğunlaşmasından bahsettiğimiz bölümde (bölüm 4.2.4'te), Marto et al. [1986], Holden et al. [1987] ve Haraguchi et al. [1991], çalışmalarında da damla kondensasyonunun arttırılması serbest yüzey enerjisi düşük polimerik kaplamalarla sağlanabilmektedir. Özetle su damlası kondensasyonu ile ısı transferinin artması için kondensasyon yüzeyinin düşük serbest yüzey enerjisine sahip olması gerekir.

4.2.4.2. Damla Kondensasyonuna Temas Açısı Karmaşasının Etkisi

Temas açısı yüksek olan yüzeyler üzerinde sıvı, damla halinde ve küresel olarak oluşacağından yüzeyde oluşan damlaların diğer damlalar ile birleşmesi gecikecektir. Damlaların birleşmesi mevcut tek damlanın büyümesine engel teşkil etmektedir. İşte bu noktada devreye temas açısı karmaşası girer. Temas açısı karmaşası, bir yüzeyin ilerleyen ve gerileyen temas açıları arasındaki fark olup yüzeylerin pürüzlülüğü ve kimyasal heterojenliğinden önemli derecede etkilenir. Temas açısı karmaşasının artması kondense olan damlaların yüzey üzerinde tek başına büyümelerine olanak verir ve yanındaki damlalarla birleşmesini engeller veya geciktirir. Bu nedenle yüzey kaplama oranının temas açısı karmaşasındaki artışla arttığı literatürde bazı çalışmalarda belirtilmektedir [Beysens and Knobler, 1986; Beysens et al., 1991; Beysens, 1995; Zhao and Beysens, 1995; Beysens, 2006].

Beysens ve Knobler [1986], oktodesiltri-klorosilan ile kaplanmış (θ_e : 90° , θ_a : 110° , θ_r : 95°) yüzeye 23°C 'de gaz göndererek (RH : %100) kondensasyonla meydana gelen damlaların büyümesini zamana bağlı olarak incelemişler ve karakterize etmişlerdir. Damlanın büyümesini 3 farklı zaman diliminde gözlemlemişlerdir. $t \leq 1$ s zamanında yüzey küçük damlacıklarla homojen olarak

kaplanmaktadır. $1 < t \leq 300$ s aralığında damlaların çapı $2 < R \leq 300$ μm aralığındadır. Yüzey üzerinde sanki birer yüzük gibi sıralanmış olarak dururlar. Bu an için yüzey kaplama oranının 0,5 civarı olduğunu rapor etmişler, damlanın çapının ise zamanın 0,23'üncü kuvvetinde büyüdüğünü gözlemlemişlerdir ($R \sim t^n$ ve $n: 0,23 \pm 0,05$). $t > 300$ s zamanında ise yüzeyde büyük ve küçük damlaların bir arada olduğu (bimodal) dağılımdan bahsetmişlerdir. Bu çalışmada silanlanmış yüzeyler 15° temas açısı histeresisine sahiptir. Beysens ve Knobler [1986], yüzeyin sahip olduğu bu histeresis değeri yüzünden damlaların düşük süpersaturasyonlarda oluştuğunu rapor etmişlerdir. Bu çalışmanın arkasına 1991 yılında Beysens et al., “Çiğ nasıl oluşur?” başlıklı çalışmayı yayınlamıştır. Bir önceki çalışmanın daha detaylı incelendiği bu makalede çiğ oluşumu, yüzey kaplama oranı ve yüzey kaplama oranına histeresisin etkisi tartışılmıştır. Çiğ, T_s sıcaklığındaki bir katı yüzey üzerine T_r sıcaklığındaki doymuş hava içerisindeki su buharının kondense olmasının bir sonucudur ($T_r > T_s$). $\Delta T_s = T_r - T_s$ eşitliği ile tanımlanan bu iki sıcaklık arasındaki farkın bulk yapıdaki homojen çekirdeklenme için olan değerden çok daha düşük olduğunu savunmuştur. Örneğin 20°C 'deki su buharı homojen çekirdeklenme koşulları söz konusu olduğunda 0°C civarında kondense olması gerekirken günlük tecrübelerimiz bize pencerelerde oluşan damlacıkların çok daha yüksek sıcaklıklarda oluştuğunu gösterir.

Kondensasyon damlaların büyüme ve birleşmesi ile meydana gelmektedir. Beysens bu çalışmasında histeresisin olmadığı veya düşük olduğu yüzeylerde bu iki proses (büyüme ve birleşme) arasında dengeye ulaşıldığında, ortalama yüzey kaplama oranının sadece sistemin boyutlarına bağlı sabit bir değere ulaştığını tespit etmiş olup, bu değeri 2 boyutlu bir yüzey üzerindeki 3 boyutlu damlalar için 0,55 olarak rapor etmiştir [Beysens et al., 1991]. Yüzey kaplama oranındaki bu sabitlik iki zıt etkiden kaynaklanmaktadır. Sürekli kondensasyon yüzey kaplama oranını artırma yönünde hareket ederken, aynı zamanda damlaların birleşme sayısında artışa neden olduğundan yüzey kaplama oranını bir yandan da düşürme etkisi göstermektedir. Çünkü yüzey kaplama oranı damlalar büyüdükçe ve çekirdeklendikçe artarken, damlalar birleştikçe azalır. Ve dolayısıyla iki zıt etki altında kalan yüzey kaplama oranı, universal sabit bir değere (0,55) ulaşmaktadır. Bu proses boyunca damlaların büyüklüğü birkaç μm den yaklaşık 300 μm 'ye kadar değişmektedir. Ancak yüzeyin heterojenliği ve pürüzlülüğünden gelen temas açısı karmaşası etkisi damlaların

büyümesi sırasındaki temas açısı ile (ilerleme temas açısı, θ_a), damlaların hemen birleştikten sonraki temas açısını (gerileme temas açısı, θ_r) birbirinden çok farklı kılabilmektedir. Buda tam birleşme olmadığından birleşme sonrasında damlaların tam küresel değil, elipsoidal şekil almasına neden olabilmektedir ve bu nedenle damlaların birleşmesi ile serbest kalan yüzey yeteri kadar büyük olamayabilir. Beysens et al., [1991], temas açısı karmaşası etkisi olduğunda yüzey kaplama oranının sürekli artmasını bu nedene bağlamıştır.

Neumann et al. [1978], altın film üzerine kapladıkları stearik ve palmitik asit kaplamalarla damla tipi yoğunlaşma sırasındaki ısı transfer karakteristikleri üzerine temas açısı karmaşasının etkisini incelemişlerdir. Çalışmanın sonucunda damla tipi yoğunlaşmanın yüzeyin sahip olduğu temas açısı karmaşası ile ilişkili olduğu, temas açısı karmaşasındaki yükselmenin ısı transfer katsayısını düşürdüğü sonucuna varmışlardır.

Zhao ve Beysens [1995], temas açısı 0° ile 100° , temas açısı karmaşası ise 10° ile 17° arasında değişen silanlanmış yüzeyler üzerine 22°C oda sıcaklığında doymuş su buharı gönderilerek kondensasyon davranışını incelemişlerdir ve yüzey heterojenliğinden kaynaklı temas çizgilerine ait “pinning (tutunma)” davranışı olarak bilinen temas açısı karmaşasının, yüzeye kondense olan damlaların büyümesinde oldukça önemli bir rol oynadığını savunmuşlardır. Çalışmada katı yüzey olarak silikon wafer kullanılmış olup, silan buharına maruz bırakılmış ve silan konsantrasyonunun değişimiyle yüzeyde ıslatılabilirliği derecelendirilmiş bir yüzey meydana getirmişlerdir. Kondense olan damlaların şeklinin temas açısı karmaşasının derecesine bağlı olarak değiştiğini göstermişlerdir. Bu çalışmada ayrıca yüzeyin damlalarla kaplanma oranı incelenmiş olup, karmaşanın gücüne bağlı olarak yüzeyin damlalarla kaplanma oranının arttığını savunmuşlardır. Karmaşanın etkisinin olmadığı durumda yüzeyin damlalarla kaplanma oranının temas açısından bağımsız olduğunu, fakat karmaşanın etkisinin söz konusu olduğu durumlarda pinning (temas çizgilerinde tutunma) etkisinden dolayı tam birleşmenin engellendiği ve böylece yüzeyin damlalarla kaplanma oranının arttığını göstermişlerdir.

Literatürde damla tipi kondensasyonun en çok incelendiği poliolefin yüzey polietilendir (PE). Briscoe et al. [2005], farklı temas açısı ve temas açısı karmaşasına

sahip polietilen, koronalanmış polietilen, polietilen/hidrosol ve kronolanmış polietilen/hidrosol yüzeyleri ıslatarak cam yüzeyler üzerine hava kabarcığı kalmayacak şekilde yapıştırmışlar, 80°C su buharına (su banyosu üzerine yerleştirerek) maruz bırakmışlar ve kondensasyonla oluşan damlaları kameraya çekmişlerdir. Film tipi kondensasyon da elde edilen sıvı filminin ışık geçirgenliği yüksek ve dolayısıyla optik özellikleri daha iyi olduğundan, bu çalışmada hedeflenen damla tipi değil film tipi kondensasyondur. Çalışmada kullanılan materyaller, onlara ait temas açısı ve temas açısı histeresisi değerleri Çizelge 4.3’de mevcuttur.

Çizelge 4.3. Saf ve hidrolizlenmiş polietilen yüzeylerin karakterizasyonu [Briscoe et al., 2005].

Yüzey	$\theta_a(^{\circ})$	$\theta_r(^{\circ})$	$\frac{CAH}{\theta_a - \theta_r(^{\circ})}$
PE	99	82	17
Korona PE	68	34	34
PE/hidrosol	60	15	45
Korona PE/hidrosol	50	10	40

Bu çalışmada da düşük temas açısına sahip yüzeylerin histeresisi daha yüksek olup bu durum kimyasal heterojenliğin artması ile meydana gelmektedir. Bu yüzeyler 1 dk, 20 dk, 26 sa ve 164 sa sonra fotoğraflanmıştır. 1 dk sonunda PE için denge yüzey kaplama oranı 0,55’te sabitlenmiştir. Bu denge yüzey kaplama oranının diğer 3 katı yüzey için histeresisteki artışla birlikte derece derece arttığını söylemişlerdir. 20 dk, 26 sa ve 164 sa sonrasında PE yüzeyde damlalar hep küresel kalmıştır. Korona PE ve PE/hidrosol yüzeylerde ise damla geometrisi histeresise bağlı olarak derece derece değişmektedir. Korona PE/hidrosol süstratta ise 100 saatin üzerinde tamamen film tipi mekanizmanın işlediğini gözlemlemişlerdir. Buda hidrosol partiküllerinin Korona PE yüzeye daha çok yapıştığını göstermektedir. Yani bu çalışmada da temas açısı karmaşası her ne kadar kimyasal heterojenliğe bağlı olarak temas açısı düşürülerek elde edilmiş olsa da sonuç olarak temas açısı karmaşasının artışı ile yüzey kaplama oranının arttığı savunulmaktadır.

4.2.4.3. Damla Kondensasyonunda Süperhidrofobik Yüzey Kullanımı

Damla kondensasyonunda ısı transferini arttırabilmek için yüzeyde meydana gelen damlaların yüzeyden bir şekilde (örneğin yüzeye eğim verilerek yer çekiminin etkisiyle) uzaklaştırılması gerekir. Fakat temas açısı karmaşası gibi yüzeyin ıslatılabilirliğine dayalı özellikler kondense olan damlaların kondensasyon yüzeyine adezyonuna (yapışıp kalmasına) neden olduğu için literatürde düşük temas açısı histeresisine sahip süperhidrofobik yüzeyler bu sorun için bir çözüm olarak düşünülmüş ve uygulamada kullanılmıştır.

Literatürde en çok çalışma özel üretilmiş süperhidrofobik yüzeyler üzerine yapılmıştır. Özel desenlenmiş (örneğin pılardan oluşan) süperhidrofobik yüzeylerde temas açısı karmaşası genellikle düşüktür çünkü damla katı ve havanın kompozit yüzeyinde ve hava paketçiklerinin üzerinde bulunmaktadır ve enerji bariyerlerinin sürekli olmayan temas çizgisinin hareketinin sınırlanması azdır. Bu yüzden damla bu tip düşük temas açısı kargaşasına sahip Cassie-Baxter ıslatma sistemindeki yüzeylerde daha yüksek kargaşaya sahip Wenzel tipi ıslatma sistemindeki yüzeylerde olduğundan daha kolay hareket eder.

150° ile 180° arasında oldukça yüksek temas açısına ve düşük temas açısı karmaşasına sahip olan süperhidrofobik yüzeylerin damla tipi kondensasyonu diğer yüzeylere nazaran daha fazla arttırdığı çok sayıda çalışmada rapor edilmiştir. [Narhe and Beysens, 2004; Narhe and Beysens, 2006; Dorrer and Ruhe, 2007; Dorrer and Ruhe, 2008; Dorrer and Ruhe, 2008; Narhe and Beysens, 2007; Jung and Brushan, 2008; Mockenhaupt et al., 2008]. Ancak bu çalışmalarda süperhidrofobik yüzeylerin bir süre sonra özelliklerini kaybettiğini de vurgulamışlardır.

Kondense olan suyun yüzey pürüzleri arasında tutunmasına ve yüzeyin süperhidrofobik özelliğini yitirmesine neden olan olumsuz etkileri ortadan kaldırmak için bazı araştırmacılar çalışmalarında iki çeşit (two-tier) pürüzlülük kullanmışlardır. Chen et al. [2007, 2008] adeta Lotus yaprağının yapısını taklit ederek mikro yapıda inşa edilmiş pıllarlar üzerine kısa karbon nanotüpleri yerleştirmişler ve elde ettikleri iki aşamalı desenlenmiş bu yüzey ile sürekliliği sağlanmış bir damla tipi kondensasyon elde etmişlerdir. Hegzadekanol kaplanmış bir

yüzey süperhidrofobik karakterini hem kondensasyon sırasında ve hem de sonrasında kaybetmemiştir. Bunun yanı sıra Lan et al. [2010], damla tipi kondensasyonu arttırmak amacıyla bakır yüzey üzerine kendiliğinden sıralanmış n-oktadesil merkaptan monotabakaları kullanarak nanoyapıların bulunduğu ve bulunmadığı süperhidrofobik ve hidrofobik yüzeyler hazırlamışlardır. Çalışmadan elde ettikleri deneysel sonuçlar nanoyapılı süperhidrofobik yüzeyin damla yoğunlaşması prosesi için ısı transfer performansını çok fazla arttırmadığı, hidrofobik olan yüzeyin ise bu nanoyapılı süperhidrofobik yüzeye nazaran çok daha iyi sonuç verdiği şeklindedir. Onlarda kondensat ve kondense olmuş yüzey arasındaki yüzeyler arası etkileşmenin damla tipi yoğunlaşma ile ısı transferinde önemli bir faktör olduğunu savunmuştur. Ancak Lan et al., [2010], damla ile nanoyapılı süperhidrofobik yüzey arasındaki temas yüzeyinin, buhar kondensasyonu prosesi esnasında adeta bir “kompozit katı-kondensat-sıvı” arayüzeyi gibi olduğu, bunda kondensat ve kondense olan yüzey arasındaki sıvı-katı serbest yüzey enerjisi farkında bir düşüşe neden olduğu ve dolayısıyla süperhidrofobik yüzeyler üzerinde meydana gelen damla tipi yoğunlaşmanın ısı transfer performansında da bir düşüşe sebep olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Bu çalışmada da temas açısı karmaşasının etkisi incelenmiş ve Neumann et al. [1978] çalışmasını destekleyerek daha büyük temas açısı karmaşasına sahip nanoyapılı süperhidrofobik yüzey üzerinde ısı transfer performansının düştüğü sonucuna varılmıştır. Ara yüzey etkileri olarak bilinen sıvı-katı serbest enerji farkı ve temas açısı karmaşasının damla yoğunlaşmasını ve dolayısıyla ısı transfer performansını çok fazla etkilediğini savunmuşlardır.

Dorer ve Ruhe [2008, 2008] iki çeşit pürüzlülüğü poliheptadekaflorodesilakrilat kalplı yüzeylere uygulamışlardır. Bu tip desenli yüzeylerde su damlaları katı yüzeyin sadece %0,01’lik fraksiyonu ile temas halinde olmakta geriye kalan %99,99’luk kısım hava ile temasta kalmaktadır. Su damlası bu iki çeşit pürüzlülüğe sahip yüzeyler üzerine kondense olduğunda çok küçük damlacıklar bile pürüzlerin arasına gömülmemekte ve kondensasyon ilerleyip damlalar arasında birleşmeler meydana geldikçe kondense olan suyun sürekli bir hareketi sağlanabilmektedir.

Boreyko ve Chen [2009] üretmiş oldukları iki çeşit pürüzlülüğe sahip süperhidrofobik yüzeyle damlaların dışarıdan hiçbir ekstra kuvvet uygulamaksızın kendiliğinden zıpladıklarını ve yüzeyi terk ettiklerini rapor etmişlerdir. Çalışmada

süperhidrofobik yüzeyin yüzey kaplama oranı (0,4) hidrofobik yüzeyinkinden (0,6) aşırı derecede düşük çıkmamıştır. Süperhidrofobik yüzeyde meydana gelen bu dinamik olay bizlere literatürde düşük temas açısı histeresisine sahip özel üretilmiş süperhidrofobik yüzeyler üzerinde ısı transfer katsayısının ve dolayısıyla ısı transferinin neden arttığının cevabını veriyor.

Damla tipi kondensasyon çalışmaları sadece süperhidrofobik yüzeylerde değil aynı zamanda ultrahidrofobik yüzeyler üzerinde de çalışılmıştır. Ultrahidrofobik yüzeylerin kondensasyon sırasında damlanın hareket edebilirliğini düşürdüğü ve histeresisin arttığını Wier ve Mc Carty [2006] öne sürmüştür. Bunun için ultrahidrofobik yüzey olarak hidrofobikleştirilmiş silikon pırlarlar kullanılmış ve optik mikroskop fotoğraflarından kondensasyon sırasında meydana gelen çekirdeklenmenin hem bu pırlarların tepelerinde ve hemde pırlarlar arasında meydana geldiğini, kondensasyon ilerlediğinde ise pırlarlar arasındaki suyun karasız hale geldiğini ve yüzeye doğru zorlandığını gözlemlemişlerdir. Pırlarların tepelerindeki damlaların ise kondense olmuş su damlaları ile birleştikçe pırlarların tepesindeki mevcut konumlarından aralarını ıslatma moduna geçtiklerini göstermişlerdir. Dinamik temas açıları ölçümlerinde ilerleme açıları neredeyse sabit kalırken gerileme açıları 0 dereceye kadar düşüş göstererek temas açısı karmaşasını ciddi derecede arttırmıştır. Bu sonuçlar kondensasyona maruz kalmış ultrahidrofobik yüzeylerin kuru yüzeylere oranla histeresiste önemli bir artışa neden olduğunu ve damla hareketinde de azalmaya sebep olduğunu göstermiş, ultrahidrofobik yüzeylerin her zaman su itici olamayabileceğini kanıtlamıştır.

5. DİFÜZYON

5.1. Difüzyon ve Sıvı Yoğunlaşması

Difüzyon, konsantrasyon gradientine ve zamana bağlı olarak dışarıdan hiçbir etki olmaksızın kendiliğinden meydana gelen moleküler hareket olayı olup kütle transferi temellerine dayanır. Gaz, sıvı veya katı bir madde sadece konsantrasyon farklılığı, sıcaklık ve basınç gibi ortam koşullarına bağlı olarak bir başka gaz, sıvı veya katı madde içine dışarıdan hiçbir etki olmaksızın kendiliğinden ve rastgele hareket edebilir. Kapağı açık bırakılan bir kolonya şişesindeki kolonyanın kokusunun odanın en uzak köşesine kadar yayılması, renkli bir tableti su dolu bir bardağa attığımızda, tabletin renginin su içine dağılarak suyun her yerinin aynı renge boyanması birer difüzyon olayı örneğidir. Kolonya kokusunun odanın en uzak köşesine yayılması saniyeler alırken, renkli tabletin suya rengini vermesi birkaç dakika sürebilir. Çünkü difüzyon olayı duruma bağlı olarak çok yavaş gerçekleşen bir olay olabilir. Gazlar için difüzyon hızı $0,16 \text{ cm/s}$ iken; sıvılarda $8 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, katılarda ise $1,6 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 'dir. Bu değerler sıcaklık ve molekülerin cinsine bağlı olarak değiştiğinden sabit değildir.

Difüzyon olayı denilince akla ilk gelen sıvı buharlaşmasında sıvı içerisindeki moleküller buharlaşmak için gerekli enerjiyi kendi içlerinden veya dışarıdan alarak sıvı yüzeyini buhar olarak terk edip gaz fazına geçerler. Bu proses sıvı yüzeyinin hemen üzerindeki gaz ortamında meydana geldiğinden, ancak o ortamda mevcut su buharı difüzyonla uzaklaştıktan sonra yeni sıvı moleküllerinin buharlaşması mümkün olabileceğinden, buharlaşma difüzyon temelli bir faz geçişidir. Aynı şekilde yoğunlaşmada buharlaşmanın tam tersi bir faz değişim prosesi olduğundan, temelleri difüzyona dayanır ve difüzyon denklemleri ile açıklanabilir. Ancak bu denklemlerin anlaşılabilmesi için buharlaşma için türetilen difüzyon denklemlerinin tanınması ve anlaşılması gerekir.

5.2. Fick Difüzyon Kanunları

Difüzyonun matematiksel tanım ve temelleri Fick'in difüzyon kanunları üzerine kuruludur. Fick'in difüzyon kanununda difüze olan maddenin akış hızı ile bu akıştan sorumlu konsantrasyon gradientine (ortamda uzaklığa göre konsantrasyonun düzgün değişimi) birleştirilmiştir. Fick'in difüzyonla alakalı iki temel kanunu vardır. Fick'in ilk kanununda gaz debisinin konsantrasyon gradienti ve alan ile bağlantılı olduğu anlatılırken; ikinci kanununda konsantrasyonun zamanla ve yerle değişimi verilir.

5.2.1. Fick'in 1. Difüzyon Kanunu

Taşıma olaylarında bir özelliğin göçme hızı, birim zamanda birim alandan geçen özellik miktarı olarak tanımlanır ve “akı” (J) olarak ifade edilir. Eğer taşınan özellik difüzyon olayında olduğu gibi madde ise, saniyede m^2 başına ne kadar molekül bir madde akışı olduğundan söz edilir. Şayet aktarılan özellik termal iletkenlikte olduğu gibi enerji ise, o zaman saniyede m^2 başına joule olarak enerji akışından söz edilmektedir.

Moleküler difüzyon bir akışkan içerisinde mevcut tek bir molekülün rastgele hareketlerle bir yerden başka bir yere taşınması veya difüzlenmesi olarak tanımlanır. Moleküler difüzyon bir konsantrasyon gradientinden kaynaklanmakta olup, bir A molekülünün difüzyonu yüksek konsantrasyon bölgesinden düşük konsantrasyon bölgesine doğrudur [Geankoplis, 2003]. B molekülleri içinden difüze olan A molekülünü Fick kanunu ile genel olarak ifade edecek olursak;

$$J_A^* = -cD_{AB} \frac{dX_A}{dz} \quad (5.1)$$

Burada “ J ” toplam gaz debisi (kg/s), “ c ” A ve B'nin kg mol (A+B)/ m^3 cinsinden toplam konsantrasyonu, “ X_A ” ise A ve B karışımındaki A'nın mol fraksiyonudur. “ c ” sabit olarak kabul edilirse; $c_A = c.X_A$ olduğundan;

$$cdX_A = d(cX_A) = dc_A \quad (5.2)$$

$$J_A^* = -D_{AB} \frac{dc_A}{dz} \quad (5.3)$$

Denklemden “ D_{AB} ” olarak verilen difüzyon sabiti olup maddenin cinsine bağlıdır. “ D_{AB} ” aynı sıcaklık ve basınç için sabit değer alır. Eşitlik 5.3’te ifade edilen “ dc_A/dz ” ise sabit değildir. Sabit konsantrasyon koşulları altında difüzyonu belirlemek mümkün değildir.

5.2.2. Fick’in 2. Difüzyon Kanunu

Fick’in ikinci kanununda konsantrasyonun zamanla ve yerle değişimi verilmektedir.

$$\frac{dc}{dt} = D_{AB} \left(\frac{d^2c}{dz^2} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dz} \frac{dc}{dz} \right) \quad (5.4)$$

Buna göre tüpteki buharın konsantrasyonunun buharın bulunduğu yere göre z doğrultusu boyunca değişimi $\left(\frac{dc}{dz} \right)$ ile gösterilir. Kararlı denge halinin olmadığı durumlarda tüpteki buharın konsantrasyonunun zamanla değişimini bulmak için $c-t$ grafiği çizilir ve hangi zamanda hangi konsantrasyonda olduğu bulunur.

5.3. Difüzyon Dinamik Denge Hali (Steady- State)

Bu hal, maddenin buharlaşma ve yoğunlaşma hızlarının birbirine eşit olduğu, difüzyonun durduğu ve kararlı halin olduğu durumdur. Kararlı denge halinde zamanla konsantrasyon değişimi yoktur, yani;

$$\left(\frac{dc}{dt} \right) = 0 \quad (5.5)$$

silindirik tüp için kesit alanı (A) sabit olacağından $dA = 0$ olur. Fick'in 2. teorisi;

$$\frac{dc}{dt} = D \left(\frac{d^2c}{dz^2} + \frac{1}{A} \frac{dA}{dz} \frac{dc}{dz} \right) \text{ ve } dA = 0 \text{ olduğundan;}$$

$$\frac{dc}{dt} = D \left(\frac{d^2c}{dz^2} \right) \quad (5.6)$$

kararlı halde konsantrasyon değişimi zamanla sıfır olduğundan; $\frac{dc}{dt} = 0$ olur ve,

$$0 = D \left(\frac{d^2c}{dz^2} \right) \quad (5.7)$$

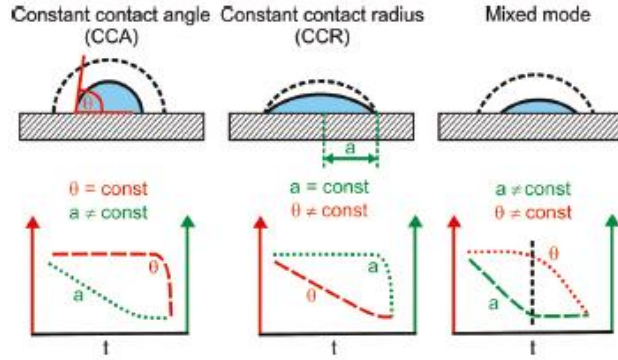
yazılır. Ancak bir sabit sayının türevi sıfır olacağından; $\left(\frac{dc}{dz} \right) = 0$ sabit olmalıdır.

Kararlı halin diğer koşulu da budur [Cussler, 1997].

5.4. Difüzyon Denklemlerinin Damla Buharlaşmasında Kullanılması

Düz bir yüzey üzerine damlatılmış organik sıvı damlaların kütlelerinin zamana karşı değişimi ve damla profilleri ilk kez Picknett ve Bexon [1977] tarafından takip edilmiş ve buharlaşmada iki temel modelin varlığı kanıtlanmıştır. Bu modellerden ilki sabit temas açısı modelidir. Sabit temas açısı modeli, buharlaşma sırasında temas açısının değişmediği, damla şeklinin küresel olarak kaldığı, temas yarıçapı ve yüksekliğinin azaldığı modeldir. Bu model ilerleyen ve gerileyen temas açıları arasında fark olmayan; sıvı, katı ve gazın dengede bulunduğu ideal sistem için beklenen bir davranıştır. İkinci model olan sabit temas alanı modelinde ise yüzey ve sıvı arasındaki temas alanı (yarıçapı) değişmemekte ve buharlaşma sırasında temas açısı azalırken damla küreselliğini korumaktadır. Buharlaşma bu modellerde olduğu gibi ayrı ayrı gerçekleşebileceği gibi, bu iki modelin karışımından oluşan ve karışık

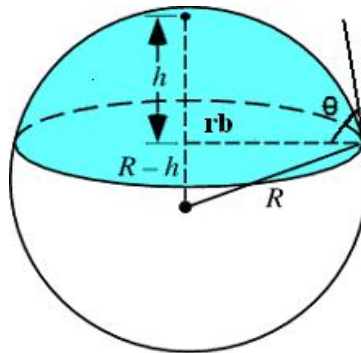
model (mixed model) olarak adlandırılan şekilde de gerçekleşebilmektedir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Katı yüzey üzerinde buharlaşan sıvı damlasının buharlaşma modelleri, [Li, 2009].

Literatürde damla buharlaşması üzerine yapılan çalışmaların büyük çoğunluğunda sıvı damlasının küresel olduğu varsayımına dayanılmıştır. Küresellikten sapan damlalar içinse çeşitli düzeltme faktörleri hesaba katılarak yeni modeller türetilmiştir. Eğer yatay bir katı yüzey üzerine damlatılan damla yeterince küçük ve küreselse, bu damla üzerine etkili olacak ve onu küresellikten sapıracak yerçekimi kuvveti damlanın yeterince küçük olmasından dolayı ihmal edilebilir.

Yatay bir katı üzerine damlatılan damla dört farklı parametre ile ifade edilir. Bunlar; damlanın yüksekliği (h), temas yarıçapı (r_b), küresel damlanın yarıçapı (R) ve damlanın katı yüzey ile yaptığı temas açısıdır (θ) [Erbil and Meriç, 1997] (Şekil 5.2).



Şekil.5.2. Küresel damlaya ait parametreler.
(<http://mathworld.wolfram.com/SphericalCap.html>)

r_b , R , θ ve h arasındaki ilişki üç boyutlu geometriden yararlanılarak aşağıdaki denklemlerle verilir [Birdi et al., 1989; Bourges-Monnier and Shanahan, 1995; Erbil and Meric, 1997; McHale et al., 1998, Erbil et al., 2002; Panwar et al., 2003; Fang et al., 2005; McHale et al., 2005; Kim et al., 2007]:

$$r_b = R \sin \theta \quad \text{ve} \quad R = \left(\frac{3V}{\pi\beta} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.8)$$

$$\beta = 2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta = (1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta) \quad (5.9)$$

V , küre parçasının hacmidir. İki yarıçapa bağlı yükseklik ise,

$$h = R (1 - \cos \theta) \quad \text{ve} \quad h = r_b \tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (5.10)$$

Damla kütlelerinin zamanla azalması Fick Kanununa dayanır ve,

$$-\frac{\partial m}{\partial t} = 4\pi R^2 D \frac{\partial c}{\partial R} \quad (5.11)$$

denklemleriyle ifade edilir. Bu denklemde;

$$\left(\frac{\partial c}{\partial R} \right) = \left(\frac{c_o - c_v}{R} \right) \quad \text{olduğundan;} \quad (5.12)$$

5.11 numaralı eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$-\frac{\partial m}{\partial t} = - \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right) \rho_L = 4RD\pi(c_o - c_v) \quad (5.13)$$

$$-\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{4\pi RD(c_o - c_v)}{\rho_L} \quad \text{yazılır,} \quad (5.14)$$

bu ifadede yer alan c_o damlanın hemen üzerindeki buhar konsantrasyonudur. Damlanın yüzey sıcaklığındaki doymuş buhar basıncı kullanılarak bulunur. İdeal gaz kanununda;

$$PV = nRT \quad \text{ve} \quad c_o = \frac{W}{V} \quad \text{alınarak} \quad (5.15)$$

$$c_o = \frac{P_{vs} M_w}{RT} \quad \text{eşitliğinden bulunur.} \quad (5.16)$$

c_v ise ortamın buhar konsantrasyonudur. Çalışılan sıvının su olmasından dolayı ortamın bağıl neminin bilinmesi önemlidir.

$$RH = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad (5.17)$$

$$P_v = RH \times P_{vs} \quad \text{eşitliğinden bulunur. Buradan} \quad (5.18)$$

$$c_v = \frac{P_v M_w}{RT} \quad \text{olarak bulunur.} \quad (5.19)$$

$$\text{Üç boyutlu geometriden; } V_3 = \frac{\pi r_b}{3} \frac{(1 - \cos\theta^2)(2 + \cos\theta^2)}{\sin^3\theta} \quad \text{yazılır.} \quad (5.20)$$

bu eşitlikte yer alan;

$$R = \frac{r_b}{\sin\theta} \quad \text{ve} \quad (5.21)$$

$$\beta = (1 - \cos\theta)^2 (2 + \cos\theta) \quad \text{alınarak} \quad (5.22)$$

$$R = \left(\frac{3 V_3}{\pi \beta} \right)^{1/3} \quad \text{yazıldığından ve,} \quad (5.23)$$

$$\frac{\partial V_3}{\partial t} = \frac{4\pi D}{\rho_L} \left(\frac{3 V_3}{\pi \beta} \right)^{1/3} (c_o - c_v) = K_1 V_3^{1/3} \quad (5.24)$$

$$K_1 = \frac{4\pi^{2/3} 3^{1/3} D (c_o - c_v)}{\rho_L \beta^{1/3}} \quad (5.25)$$

Ancak, katının varlığı nedeniyle damla sadece yukarıya doğru buharlaşabildiğinden $f(\theta)$ faktörünün de hesaba katılması gerekmektedir. Bu durumda;

$$\frac{\partial V_3}{\partial t} = K_1 V_3^{1/3} f(\theta) \quad (5.26)$$

şeklinde yazılır. Bu ifadenin integrali alınır,

$$V_3^{2/3} = V_{3i}^{2/3} - \frac{2}{3} K_1 f(\theta) t \quad (5.27)$$

şeklini alır. Grafiğindeki eğim $= -\frac{2}{3} K_1 f(\theta)$ eşit olur.

V_3 değeri [Meriç and Erbil, 1998];

$$V_3 = \frac{\pi r_b^2 h (2 + \cos\theta)}{3 (1 + \cos\theta)} \quad \text{olarak ifade edilir.} \quad (5.28)$$

Picknett ve Bexon tarafından;

$$f(\theta) = \frac{1}{2} \left[\frac{C}{R_s} \right] \quad [\text{Picknet and Bexon, 1977}] \quad (5.29)$$

olarak verilir. 10°C- 180°C arasındaki sıcaklıklar için;

$$\frac{C}{R_s} = 0,00008957 + 0,6333 \theta_{rad} + 0,1160 \theta_{rad}^2 - 0,08878 \theta_{rad}^3 + 0,01033 \theta_{rad}^4 \quad (5.30)$$

olarak ifade edilir. Buradan suyun difüzyon sabiti aşağıdaki eşitlikten bulunabilir.

$$D = \frac{K \rho_L \beta^{1/3}}{4\pi^{2/3} 3^{1/3} D (c_o - c_v)} \quad (5.31)$$

5.5. Difüzyon Denklemlerinin Damla Yoğunlaşmasında Kullanılması

Bir su damlası sıcaklığı su damlasının doygunluk sıcaklığından daha düşük bir yüzey üzerine kondense olduğunda ilk olarak atmosferde hali hazırda mevcut su buharının direkt kondensasyonu ile büyür ve bu olay doğada çiğ oluşumu ile benzer özellikler gösterir [Beysens et al., 1991]. Kondensasyonun bu kısmı tıpkı damla buharlaşmasında olduğu gibi difüzyon prosesi tarafından yürütüldüğünden atmosferik ortamda meydana gelen damla tipi kondensasyon damla yoğunlaşmasının oldukça yavaş gerçekleştiği çiğ koşullarında Fick'in difüzyon yasası tarafından karakterize edilebilir ve damla buharlaşması için kullanılan difüzyon denklemleri bu koşullarda damla yoğunlaşması içinde kullanılabilir. [Sokuler et al., 2010].

Damla buharlaşması üzerine gerçekleştirilen çalışmaların büyük çoğunluğunda izole damlaların buharlaşması dikkate alınır ve bu izole damlaların buharlaşırken hacimlerinde meydana gelen azalma zamana karşı kaydedilir. Bu çalışmalarda su damlaları genellikle sabit temas açısı modelinde buharlaşmakta olup hacimlerinin $2/3$. kuvvetindeki ($V^{2/3}$) azalma zamana karşı lineer bir değişim gösterir [Rowan et

al., 1995; Erbil and Meric, 1997; Meric and Erbil, 1998; McHale et al., 1998; Erbil et al., 2002].

Damla buharlaşmasında tek bir damla ile ilgilenilirken; damla kondensasyonunda bir yüzey üzerine kondense olan çok sayıda damla dikkate alınmak zorunda kalınır. Sık istiflenmiş çok sayıda damla içinde bulunan tek bir damlanın hacminin zamana karşı lineer olarak büyüdüğü çok sayıda çalışmada rapor edilmiştir [Beysens and Knobler, 1986; Beysens et al., 1991; Fritter et al., 1991; Briscoe and Galvin, 1991; Briscoe and Galvin, 1991; Beysens, 1995; Beysens, 2006]. Ancak bu çalışmaların hiçbirinde damla buharlaşması için kullanılan difüzyon denklemlerinin damla yoğunlaşmasında test edilebilirliği incelenmemiştir.

Sokuler et al. [2010] ilk kez damla buharlaşmasında kullanılan denklemlerin damla yoğunlaşmasında da kullanılabileceğini göstermişlerdir. Difüzyon kontrollü bir damla buharlaşması prosesinde sıvı damlasının hacminde meydana gelen azalma Eşitlik 5.32 ile verilir [Erbil, 2006; Picknett and Bexon, 1977; Erbil, 1998; McHale et al. 1998; Erbil et al., 2002; McHale et al., 2005; Erbil, 2012],

$$-\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{4\pi D}{\rho_L} \left(\frac{3V}{\pi\beta} \right)^{1/3} (c_o - c_\infty) f(\theta) = K f(\theta) V^{1/3} \quad (5.32)$$

Bu eşitlik, Eşitlik 5.26'nın açık halidir. Burada D difüzyon katsayısı, ρ_L sıvının yoğunluğu, c_o damla yüzeyindeki buhar konsantrasyonu, c_∞ sonsuz uzaklıktaki buhar konsantrasyonu ve θ denge temas açısıdır. Bu denklemde β ve $f(\theta)$ Eşitlik 5.9, 5.29 ve 5.30'dan yerine yazılacak olursa ve Eşitlik 5.32 integre edilirse; Eşitlik 5.27 elde edilir. Burada $V^{2/3}$ değerleri zamana karşı grafiğe geçirildiğinde lineer doğrular elde edilir. $c = \frac{M P^v}{R T}$ olduğundan (M sıvının moleküler ağırlığı, P^v sıvının buhar basıncı, R gaz sabiti ve T Kelvin cinsinden sıcaklıktır) $(c_o - c_\infty)$ parametresi buhar basınçları cinsinden yazılabilir.

$$(c_o - c_\infty) = \frac{M}{RT} (P_o^v - P_\infty^v) \quad (5.33)$$

Sırasıyla damla yüzeyindeki ve sonsuz uzaklıktaki buhar basınçları olan P_o^v ve P_∞^v arasındaki büyüklük sıralaması damla yoğunlaşması için damla buharlaşmasında olduğunun tam tersidir yani $P_\infty^v > P_o^v$ 'dır. Bu durumda Eşitlik 5.27;

$$V^{2/3} = V_i^{2/3} + \left(\frac{3}{\pi \beta} \right)^{1/3} \left[\frac{8 \pi D M}{3 \rho R T} (P_\infty^v - P_o^v) f(\theta) \right] t \quad (5.34)$$

Eşitlik 5.34 haline gelir.

Sokuler et al., [2010] damla kondensasyonunda meydana gelen izole damlaların hacimlerindeki artışı göstermek için Eşitlik 5.34'ün ters versiyonunu ($V \propto t^{3/2}$) kullanmışlardır. Bu çalışmada, bir kondensasyon hücresi içerisine aldıkları AFM tipi (kantilever) üzerinde damla yoğunlaşması takip etmişlerdir. Çalışmada ortamın nemini N_2 gaz akışı ile doygün hale getirdikleri su buharı ile kontrol etmişlerdir. Çalışmada kullanılan AFM tipi 1x90x950 μm boyutlarında olup damlaların büyüdüğünde ulaşabilecekleri maksimum boyuttan büyük olmayacak derecede küçüktür. Sokuler et al. [2010] bu çalışmada ilk kez damla tipi kondensasyonun ve damla buharlaşmasının aynı kinetiği takip ettiğini ve her iki proseste difüzyon limitli olduğundan damla buharlaşması için türetilen difüzyon eşitliklerinin damla yoğunlaşmasında da kullanılabileceğini göstermişlerdir. AFM tipi çiğlenme noktasının altına soğutulduğunda; sık istiflenmiş damlalar içerisindeki tek bir damlanın hacminin zamana karşı lineer olarak arttığını ($V \propto t$) rapor etmişlerdir. Oysaki diğer damlalardan izole edilen tek bir damlanın hacminin 2/3. kuvvetinin zamana karşı lineer olarak değiştiğini rapor etmişlerdir ($V \propto t^{3/2}$). Sokuler et al., [2010], bu durumu komşu damla etkisi ile açıklamışlardır.

5.6. Merkez Damla Etrafındaki Komşu Damlaların Kondensasyon Hızına Etkisi

Damla kondensasyonu ile düzgün bir yüzey üzerine damlalar yayıldığında birbirine komşu damlalar atmosferden kondense olan su buharını paylaşırlar ve tüm damlalar boyutlarına bağlı olmaksızın hacimlerini zamana karşı lineer olarak attırırlar. Halbuki etrafındaki komşu damlalardan izole olmuş bir damla o alana kondense olan su buharının büyük bölümünü üzerine alır ve üzerine kondense olan su buharı bu damlanın artan çapı ile birlikte artar [Sokuler et al., 2010]. Benzer bir durum damla buharlaşması için Frassy et al. [2006]'ın yapmış oldukları çalışmada da görülmüştür. Frassy et al. [2006], bu çalışmada tek ve üç damlanın bir arada bulunduğu durumda damla buharlaşma hızlarını karşılaştırmışlar ve üç damlanın bir arada bulunduğu durumda üçlü damlanın etrafındaki buhar konsantrasyonları üst üste çakıştığından bu durumdaki buharlaşma hızının tek damlanın buharlaşma hızından daha düşük olduğunu rapor etmişlerdir.

Buradan, hem damla buharlaşmasında ve hem de damla yoğunlaşmasında ortamda birden fazla damla bulunmasının buharlaşma ve yoğunlaşma hızını düşürdüğünü, her iki durumda da komşu damlaların baskılayıcı etkisinden uzak izole damlaların sık istiflenmiş damlalara nazaran daha hızlı buharlaşıp daha hızlı yoğunlaştıklarını çıkarabiliriz.

6. MATERİYAL – METOT

6.1. Polimerik Yüzeylerin Hazırlanması

76x26 mm boyutlu ISOLAB marka cam slaytların temizliğinde öncelikle kromik asit çözeltisi kullanılmıştır. Kromik asitten çıkarılan camlar önce distile ve daha sonra ultra saflıktaki su ile yıkanmış ve vakum etüvünde 100°C’de kurutulmuştur. Kaplama öncesinde polimerlerin cam üzerine olan adezyonunu arttırmak için cam slaytlar iki komponentli ve 50 mg/ml konsantrasyonda kloroformda hazırlanan 404 çözeltisi ile daldırma yöntemi kullanılarak çift taraflı olarak kaplanmıştır.

Polipropilen (PP), Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE), Polipropilen-Polietilen Siklik Olefin Kopolimer (PPPE) (%12 Etilen içerikli), Düşük Yoğunluklu Polietilen (LDPE) ve Etilen Vinil Asetat Kopolimer (%12 Vinil Asetat içerikli) (EVA) polimerleri 60-130°C arasında ksilen çözücüsü içinde 20-40 mg/ml konsantrasyonda çözülmüştür. Kullanılan polimerlerin teknik özellikleri Çizelge 6.1’de verilmektedir. Denemeler boyunca kullanılan ksilen çözücüsü TEKKİM Kimya Sanayi ve Ticaret Ltd. Şirketinden temin edilen teknik ksilen olup büyük çoğunluğunu m-ksilenin ve diğer kalan küçük miktarı o-ksilen ve p-ksilenin teşkil ettiği bir karışımdır (Çizelge 6.2).

Çözme işlemi sıcaklığı kontrol altında tutulan termik yağ içinde gerçekleştirilmiştir. Çözme işlemi için kurulan deney düzeneği, (1) ısıtıcı, (2) kısıkaç, (3) termik yağ, (4) termometre (çözelti sıcaklığının kontrolü için) ve (5) çözeltiden ibarettir (Şekil 6.1). Elde edilen çözeltiler daldırarak kaplama aleti (mekanik dipper) kullanılarak spesifik sıcaklık ve daldırma hızlarında cam yüzeylere kaplanmıştır (Şekil 6.1). Polimer kaplı cam slaytlar kuruması için vakum etüvünde 1 gece bekletilmiş ve deneme yapılarına dek desikatör içinde muhafaza edilmiştir. Kaplanan polimer yüzeylerin kalınlıkları bir mikrometre kullanılarak tayin edilmiş ve kaplama kalınlıkları PP ve EVA yüzeyler için 0,5-1,0 µm, PPPE yüzey için 1,5-2,0 µm, HDPE yüzey için 3,0 µm ve LDPE yüzey için 2,0 µm olmak üzere 0,5-3,0 µm arasında olduğu tespit edilmiştir. Çift taraflı polimer kaplı yüzeylerin tek tarafı (soğuk bakır hücre ile temas edecek olan tarafı) ısı transferini önleyici bir tabaka

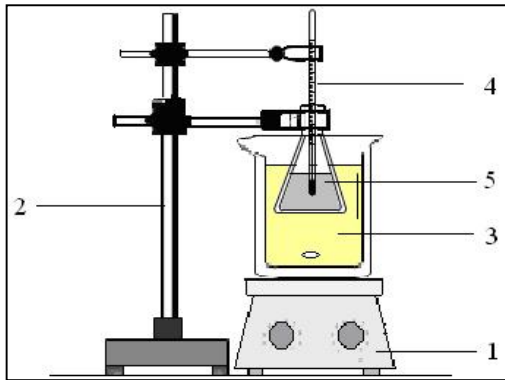
teşkil etmemesi için kondensasyon denemeleri öncesinde kazınarak ve solventle silinerek temizlenmiştir.

Çizelge 6.1. Polimerlerin teknik özellikleri.

Polimer	Yoğunluk (g/cm ³)	MFI (g/10min) (2,16 kg, 190°C)	Üretici Firma	Ticari İsmi
PP	0,928	3,41	PETKIM Petrochemicals	PETOPLEN MH-418
HDPE	0,953	0,16	Lyondell Bassell	HOSTALEN GM 8255
PPPE	0,867	0,92	Dow Chemical	VERSIFY 2300
EVA-12	0,931	2,2	DuPont Inc.	ELVAX 660
LDPE	4,1-5,4	4,85	PETKIM Petrochemicals	F5-21T

Çizelge 6.2. Teknik ksilenin fiziksel özellikleri.

Kimyasal Bileşimi	$C_6H_4(CH_3)_2$
Molekül Ağırlığı, (g/mol)	106,17
Yoğunluk, (g/cm ³), (20°C /4°C)	0,860-0,866
Kaynama Noktası Aralığı, (°C)	137-143
Saflık Oranı, (%)	97,5



(a)

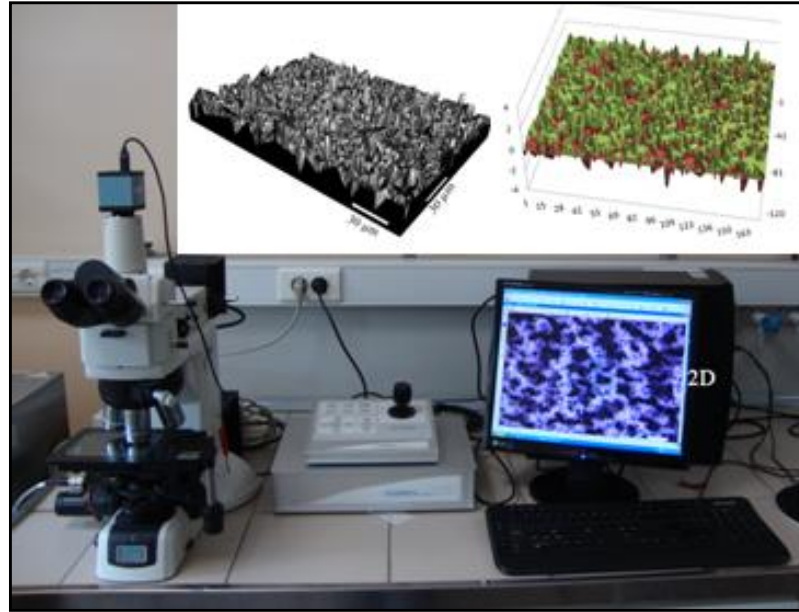


(b)

Şekil 6.1. (a) İnce film kaplamak için kullanılan deney düzeneği ve (b) mekanik dipper.

6.2. Polimerik Yüzeylerin 2D Optik Mikroskop ve 3D Yüzey Profilometresi Kullanılarak Görüntülenmesi

Polimerik yüzeylerin iki boyutlu (2D) yüzey topoğrafileri NIKON ECLIPSE LV 100 model optik mikroskop kullanılarak (Şekil 6.2) 500x büyültmede görüntülenmiştir. Yüzeylerin üç boyutlu (3D) yüzey profilleri ise yine NIKON ECLIPSE LV 100 model optik mikroskoba monte edilmiş yüzey profilometresi kullanılarak (Şekil 6.2) 500x büyültmede görüntülenmiştir. Kullanılan yüzey profilometresi, z ekseninde motorize, x ve y ekseninde manuel kontrol imkanı sağlayan bir cihazdır. Sahip olduğu yazılım sayesinde yüzeyden kademe kademe alınan fotoğraflar cihazın kendi hafızasında birleştirilip üç boyutlu yüzey topoğrafisi olarak kullanıcıya sunulmaktadır. Cihaz yüzey pürüzlülüğünü, karekök ortalama (R_{rms}) ve aritmetik ortalama (R_a) yüzey pürüzlülüğü olarak verebilmekle beraber, maksimum profil yüksekliği (R_t), maksimum pik yüksekliği (R_p), maksimum vadi derinliği (R_v) değerlerini de rapor edebilmektedir. Ayrıca cihazın sağlamış olduğu veriler kullanılarak yüzey pürüzlülüğüne ait formüller yardımıyla ortalama maksimum profil yüksekliği (R_z), ortalama maksimum pik yüksekliği (R_{pm}), maksimum pürüzlülük derinliği (R_{max}) gibi değerlerde hesaplanabilmektedir.



Şekil 6.2. NIKON ECLIPSE LV 100 2D optik mikroskobu ve 3D yüzey profilometresi.

6.3. Polimerik Yüzeyler Üzerinde Su Damlası Temas Açısı Ölçümleri

Temas açısı ölçümleri dijital bir kamera ile bilgisayara bağlanmış KSV CAM 200 model (KSV, Finland) gonyometre (Şekil 6.3) kullanılarak ölçülmüştür. Denge temas açısı ölçümleri (θ_e) için cihaza bağlı motorize dispenser (sıvı dağıtıcı) yardımıyla ultra saflıkta ve 5 μ l hacminde su damlası polimer yüzeye damlatılarak gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerde damla buharlaşma etkisini ve bundan gelecek hataları asgariye indirmek için saniye bazında sıklıklarla görüntü alabilen hızlı bir kamera kullanılmaktadır. Polimerik yüzeyler üzerinde ilerleme temas açıları (θ_a) ilk olarak yüzeye konulan 3 μ l hacmindeki damlanın üzerine 5 μ l hacminde su damlasını eklerken damlanın temiz yüzeyde ilerlemesi takip edilerek ve damlanın ulaştığı maksimum temas açısı bandı dikkate alınarak tespit edilmiştir. Gerileme temas açıları (θ_r) ise 8 μ l hacme ulaşan damla üzerinden 4-5 μ l hacminde su damlasını dikkatli ve yavaş bir şekilde çekerken tespit edilmiştir. Gerileme temas açısı ölçümleri bu ölçümler arasında en zor olan ölçüm türü olduğundan elde edilen sonuçların doğruluğundan emin olmak için damla buharlaşması deneylerinden elde edilen sonuçlarla da karşılaştırılmıştır. Ölçümler numunelerin en az 6 farklı bölgesinden ölçülmüş ve ortalama değerler olarak rapor edilmiş olup sonuçlar ± 1 aralığında değişmektedir.



Şekil 6.3. KSV CAM 200 temas açısı ölçüm cihazı.

6.4. Polimerik Yüzeylerin Serbest Yüzey Enerjilerinin Belirlenmesi

Polimerik yüzeylerin serbest yüzey enerjisi değerlerinin tespiti için öncelikle su, etilen glikol, formamid, metilen iyodür ve α -bromo naftalen damlalarının polimerik yüzeyler üzerinde verdiği temas açısı ölçüm değerleri tespit edilmiştir. Ölçümlerde hem dispersif, hem polar ve hem de hidrojen bağı etkileşimlerini dikkate aldığından diğer metotlardan daha üstün bir metot olan van Oss-Good-Chaudhury (asit-baz metodu) kullanılmıştır (Eşitlik 2.13).

Metilen iyodür ve α -bromo naftalen temas açıları γ_s^{LW} , su-etilen glikol ve su-formamid çiftleri ise γ_s^+ ve γ_s^- değerlerinin tespitinde kullanılmıştır.

6.5. Su Damlası Yoğunlaşmasının Mikroskop Altında İncelenmesi

Mikroskop altında gerçekleştirilen su damlası yoğunlaşması denemeleri için 140x190x20 mm ebatlarında mikroskop altına girecek bir dikdörtgen bakır (%99,9 elektrolitik bakır) hücre yaptırılmıştır. Burada kullanılan sistem bu bakır hücre ile birlikte optik mikroskop, soğutma suyunun sağlandığı sirkülör, higrometre ve termometrelerden ibarettir.

Polimer yüzeyler öncelikle 1 mm kalınlığında %99,9 saf elektrolitik bakır blok üzerinde yatay olarak yerleştirilmiş ve oda sıcaklığından ortamın çiğlenme noktasına yakın olan sıcaklığa kadar hızlı bir şekilde soğutulmuştur. Çiğlenme noktası ortamın bağıl nemine ve sıcaklığına bağlı olarak termodinamik tablolar kullanılarak hazırlanmış çiğ noktası hesaplayıcı program kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 6.4).

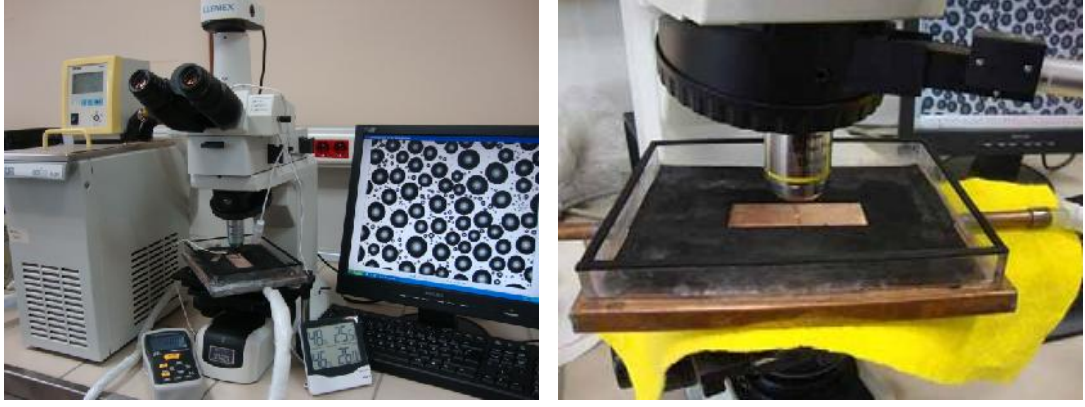
Temperature scale
☒ Celsius ☐ Fahrenheit ☐ Kelvin

	Value	Accuracy
Temperature	26.5	
Relative Humidity [%]	63	± 1
Dew Point Temperature	18.89	± 0.25
Saturation Vapor Pressure [kPa]	3.4645	

Şekil 6.4. Çiğ noktası hesaplama programı.
 (<http://www.decaturn.de>)

Soğutma suyu bu bakır bloğun içerisinde LAUDA RE 200 model sirkülör kullanılarak 290 K’de geçirilmiştir. Oda sıcaklığı 299,5 K olup ortamın bağıl nemi %63’tür. Polimerik yüzeyler üzerinde ölçülen sıcaklık 292 K olup, K tipi sıcaklık problemleri kullanılarak ölçülmüştür. Bu koşullardaki çiğlenme sıcaklığında 292 K olduğundan denemeler çiğlenme sıcaklığının hemen altında gerçekleştirilmiştir. Ortamdaki havadan polimerik yüzeyler üzerine kondense olan su buharının oluşturduğu desenler (breath figures) NIKON ECLIPSE LV 150 L metal mikroskopla (Şekil 6.5) 200x büyültme kullanılarak fotoğraflanmıştır. Periyodik olarak fotoğraflanan kondense olmuş su buharı resimleri daha sonra UTHSCSA ve Image J görüntü işleme ve analiz programları kullanılarak işlenmiş ve analiz edilmiştir.

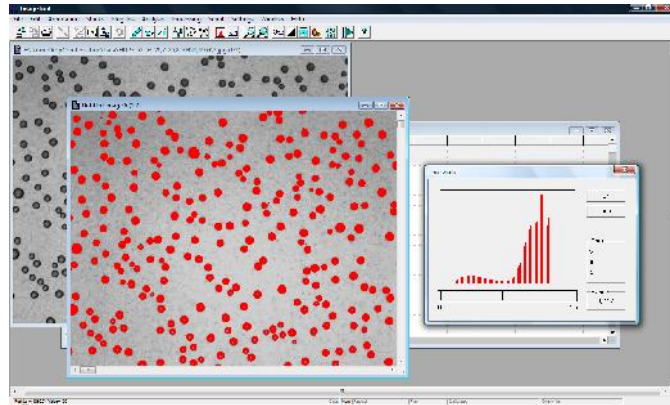
Burada anlatılan yöntem mikroskop altında %35-%47 aralığındaki düşük bağıl nemlerde gerçekleştirilen denemelerde ve %42-43 nemde aynı polimerin (PPPE) farklı katı sübstratlara kaplandığında ısı transfer katsayısının damla kondensasyonun hızına etkisinin incelendiği denemelerin mikroskop altında takip edilen kısmında da yukarıda anlatıldığı şekilde gerçekleştirilmiştir.



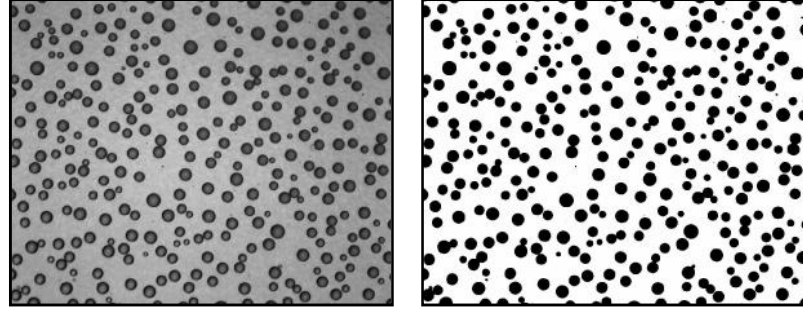
Şekil 6.5. NIKON ECLIPSE LV 150 L metal mikroskobu.

6.5.1. Kondense Olmuş Damlalarının Görüntü İşleme ve Analiz Programları (UTHSCSA Image Tool ve Image J) Kullanılarak İşlenmesi

Polimerik yüzeyler üzerine kondense olan damla fotoğrafları ilk olarak Image J programı kullanılarak siyah/beyaz (binary) formata dönüştürülmüştür. Mikroskop ışığını yansıtan bu damlaların siyah/beyaz formata dönüştürüldüklerinde içi boş kaldığı için resimlerdeki damlaların içi Adobe Photoshop CS5 programı kullanılarak doldurulmuştur. İçi doldurulmuş siyah/beyaz fotoğrafların herbiri UTHSCSA görüntü işleme ve analiz programında açılmış, işlenmiş ve analiz edilmiştir. UTHSCSA görüntü işleme ve analiz programı gri ölçekli ve renkli şekillerin işlenebildiği, analiz edilebildiği, sıkıştırılabildiği Microsoft Windows 9x, Windows ME veya Windows NT işletim sistemi ile uyumlu bir programdır (Şekil 6.6 ve 6.7).



Şekil 6.6. Çekilen fotoğrafların UTHSCSA görüntü işleme ve analiz programı tarafından işlenmesi.



Şekil 6.7. Orjinal resim (sağdaki), siyah/beyaz (işlenmiş) resim (soldaki).

Bu program yardımıyla polimer yüzey üzerindeki her bir damlanın perimetresi piksel biriminde tespit edilebilmiştir. Optik mikroskopta 200x büyültmede çekilen skala bu programda açılarak birim uzunluğu piksel cinsinden tayin edilmiş, sonrada piksel ve mikron arasında bağıntı kurularak boyutlar mikron cinsinden rapor edilebilmiştir.

Bundan sonraki aşamada iki parametrelili küresel damla modeline ait hacim ve alan denklemlerini (Eşitlik 6.1, 6.2 ve 6.3) kullanarak her bir damla için hacim ve alan hesabı yapılmıştır.

$$A_{LS} = \pi r_b^2 \quad (6.1)$$

$$A_{LV} = \frac{2 \pi r_b^2}{1 + \cos \theta} \quad (6.2)$$

$$V = \frac{\pi r_b^3 (2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta)}{3 \sin^3 \theta} \quad (6.3)$$

6.6. Su Toplama Denemeleri

6.6.1. Bakır Hücre Kullanılarak Yapılan Su Toplama Denemeleri

Su damlası yoğunlaşması denemeleri aşağıda şematik olarak çizimi gösterilen, eğik yüzeyi plexiglass hücre ile dış ortamdan izole edilen sistemde gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.8).

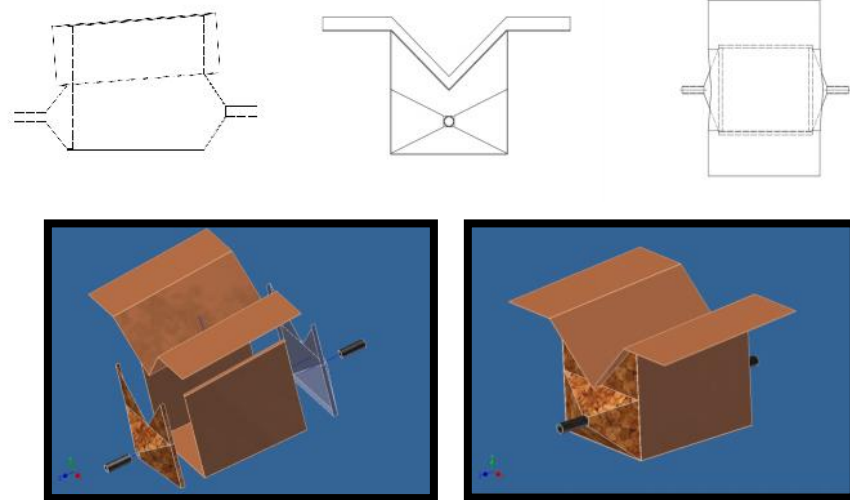


Şekil 6.8. Bakır hücreyle su toplama denemelerinin gerçekleştirildiği deney düzeneğinin fotoğrafı.

Bakır soğutucunun eğik yüzeyine yerleştirilen yüzeyler nemi sabitlenmiş ortamda kondensasyona maruz bırakılmış ve yüzeyler üzerinden kayarak biriken su miktarlarındaki ağırlık artışı zamana bağlı olarak tespit edilmiştir. Deney sistemi aşağıdaki elemanlardan oluşmaktadır.

- Bakır Hücre
- Plexiglass Hücre
- Doygun Tuz Çözeltileri (nem sağlayıcı ortam olarak su da kullanılmıştır)
- Sıvı Sirkülatörü
- Termometreler
- Termo-Higrometreler
- Toplama Kabı

Bakır Hücre: Tasarlanan bakır hücrenin kurulmasında ısıyı iyi iletmesi açısından %99,9 saflıkta elektrolitik bakır kullanılmıştır. Planlanan ölçülerde kestirilen bakır parçalar birbirine soğuk lehim yapılarak kaynatılmıştır. Yaptırılan bakır hücre içerisine 1600 ml su alma kapasitesine sahiptir. Sistemin iki kanadı arasında 90° açı bulunmaktadır. 76x130 mm boyutlarındaki eğik yüzeylerin her biri 76x26 mm boyutunda 5 tane lamı test etmeye olanak verecek şekilde tasarlanmıştır (Şekil 6.9).



Şekil 6.9. Bakır hücrenin sırasıyla yandan, önden, üstten ve katı model görüntüsü.

Plexiglass Hücre: Sistemi dış ortamdan izole etmek amacıyla kullanılan plexiglass hücre 5 mm kalınlığındaki plexiglass malzemeden 480x440x280 mm boyutlarında yaptırılmış olup, üst tarafındaki kapakla arasında sızdırmazlığı sağlamak amacıyla kauçuk şerit kullanılmıştır. Hücrenin ön ve arka tarafında 1 cm çaplı plastik borunun gireceği delikler, üst kapakta 4 adet K-tipi termo prob kablusunun gireceği delikler ve 1 adet termo-higrometrenin gireceği delik dışında açık kısmı bulunmamaktadır. Bu deliklerden de ilgili parçalar geçtikten sonra kalan boşluklar cam macunu ile izole edildiğinden sistemin dış ortamdan tam bir izolasyonu sağlanmıştır.

Doygun Tuz Çözeltileri: Doygun tuz çözeltileri, %50 nem için Merck $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ve %75 nem için Merck NaNO_3 tuzunun saf su kullanılarak hazırlanmış doymuş çözeltisi kullanılarak hazırlanmış olup her tarafı izole plexiglass hücre içerisinde bir gece sonrasında sabit nem ortamı sağlamaktadır. %90 ve üzeri nem sağlama için ise plexiglass hücrenin içinin $\frac{1}{4}$ 'ü saf su ile doldurulmuştur.

Sıvı Sirkülatörü: Bakır hücre içerisinde belirli sıcaklıktaki soğuk suyun sirkülasyonunun sağlanması için LAUDA ecoline RE 204 marka sirkülatör kullanılmıştır. Bu sirkülatörünün çalışma sıcaklığı aralığı $-10^\circ\text{C} - 200^\circ\text{C}$ aralığında olup, banyo haznesi 130x105x160 mm boyutlarındadır. Sirkülatörün kendisi 180x320x524 mm ebatlarında olup 4,5 lt iç hacme sahiptir. $\pm 0,01^\circ\text{C}$ hassasiyetle

sıcaklık kontrolü mümkündür. Basınç pompası akış hızı maksimum 17 litre/dakikadır.

Örneğin, yüzeyde 2°C sıcaklığı sağlamak için sirkülatörün -3,5°C'ye ayarlanması gerektiği ön denemelerle tespit edilmiştir. Ancak bu sıcaklık kontrolü su 0°C'de donduğundan dolayı su ile sağlanamayacağından propilen glikol-su karışımı ağırlıkça %30 oranında hazırlanmış olup, sirkülatöre beslenmiştir. Sirkülatörden -3,5°C'de çıkan %30'luk propilen glikol – su karışımı 1 cm çapındaki plastik borular yardımı ile plexiglass hücredeki delikten geçerek bakır hücreye taşınmaktadır.

Termometreler: Kondensasyonun meydana geldiği eğik yüzeylerdeki sıcaklık değişimi, eğik yüzeylere 4 farklı noktadan değmesi sağlanan K-tipi sıcaklık probları ile ölçülmüştür. Bu probların çalışma aralığı -50°C – 400°C aralığındadır. K-tipi problar ile ölçülen sıcaklık değerleri CEM DT 613 marka 2 adet termometre kullanılarak görüntülenmiştir. Termometreler 165x76x43 mm boyutlarında olup her birine iki adet K tipi prob bağlanabilmektedir. Böylece bir termometre yüzeyde K-tipi prob ile ölçülen iki farklı noktadaki sıcaklık değerini aynı ekranda gösterebilmektedir (Şekil 6.10).

Termo-Higrometreler: Ortamın bağıl nemi ve sıcaklığı TFA marka 2 adet ve TESTO 615 marka 1 adet termo-higrometre kullanılarak kontrol edilmiştir. TFA marka termohigrometreler plexiglass hücrenin ön ve arka tarafında tabana, TESTO 615 marka termo-higrometre ise plexiglass hücrenin kapağına açılan delikten tavana asılı olarak yerleştirilmiştir (Şekil 6.10).



Şekil 6.10. Denemelerde kullanılan termohigrometre ve termometreler.

Toplama Kabı: Kondensasyon denemeleri sonrasında eğik yüzeylerden zamana karşı toplanan suyun tespit edilmesi için dereceli mezür kullanılmıştır.

İlk denemeler bakır hücrenin eğik kanatları üzerine yerleştirilmiş sırasıyla 1 mm kalınlığındaki bakır plakalar, çelik plakalar ve cam lamalar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kondensasyon denemesinin gerçekleştirileceği yüzeyler aseton, etanol ve saf su ile temizlenip kurutularak yüzeylerin üzerlerindeki yağ ve pisliklerden arındırılması sağlanmıştır. Hazırlanan yüzeyler cımbız yardımı ile bakır hücrenin eğik yüzeylerine yerleştirilmiş ve bir gece boyunca hücrenin nem dengesinin sabitlenmesi için denemeye hazır şekilde beklemeye bırakılmıştır.

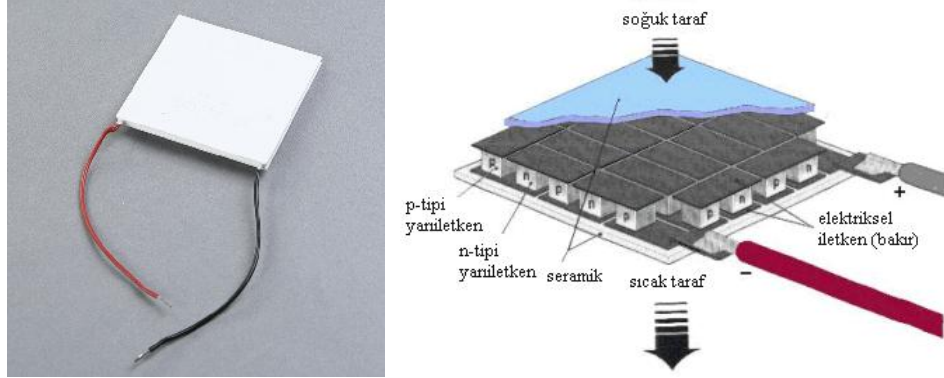
İlk olarak sirkülatördeki 1'er °C'lik düşüşlerle bakır hücrenin kondensasyonun takip edileceği eğik yüzeylerinde farklı noktalarda herhangi bir sıcaklık gradienti meydana gelip gelmediğinin, farklı noktalara aynı sıcaklığın iletilip iletilmediğinin kontrolü yapılmış, yüzeydeki 4 farklı noktada ciddi farklar görülmemiştir.

Belirli bağıl nem koşulları altında yüzey çiğlenme sıcaklığının altına düştüğünde yoğunlaşma meydana gelmekte, bu yoğunlaşma ile eğik yüzeylerde biriken su damlaları zamana karşı toplanmaktadır.

6.6.2. Peltier Elemanı Kullanılarak Yapılan Su Toplama Denemeleri

Peltier elemanı genellikle 12 V gerilim ile çalışan bir tarafı çok soğuk olup diğer tarafı aşırı sıcak olan elektronik bir alettir. Taşınabilir buzdolaplarında, tıbbi cihaz teknolojilerinde, otomobil soğutucularında ve bilgisayar CPU soğutma sistemlerinde kullanılır. Peltier elemanı P ve N uçlarının seri bağlanmasıyla çalışır ve içinden doğru akım geçtiğinde "*Peltier etkisi*" diye bilinen fiziksel bir etki ortaya çıkarır (Şekil 6.11). Bu etki ile malzemenin bir yüzü ısınırken diğer yüzü soğur. Peltier elemanları çeşitli gerilim ve ebatlarda olabilirler, 6-12-24 V gerilimde çalışanları vardır. Anot ve katot uçları bulunmaktadır. Peltier elemanına doğru polarizasyonda gerilim verildiğinde bir yüzeyin ısındığı, diğer yüzeyin soğuduğu görülür. Polarizasyon yönü değişince ısınan ve soğuyan yönler de değişir. Kullanım alanına göre bazı dezavantajları vardır. Yüzey soğutmak için kullanılıyorsa, arka yüzeyinden

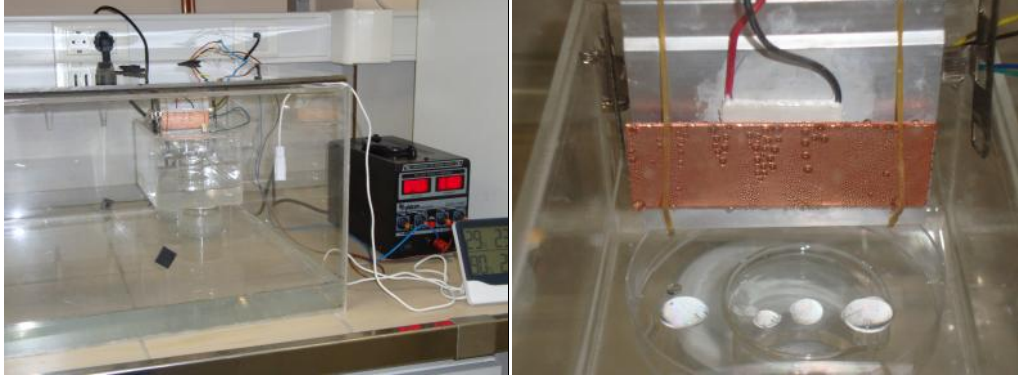
çıkan yüksek ısı nedeniyle arka yüzeyin bir şekilde soğutulması gerekir. Yoksa aşırı ısınmadan dolayı Peltier elemanı kolayca yanabilir.



Şekil 6.11. Peltier elemanı ve Peltier elemanını meydana getiren bileşenler.
(www.digit-life.com/articles/peltiercoolers/p6.gif)

Çalışmalarımızda Peltier elemanı olarak 3x3 cm boyutlarında, 12 V gerilim ile çalışan ve doğru akım kaynağı ile beslenen bir sistem kullanılmıştır. Peltier elemanına belirli değerde gerilim uygulanarak yüzey sıcaklığının istenilen sıcaklığa düşürülmesi sağlanmıştır. Peltier elemanının ısınan tarafına bir bilgisayar fanı bağlanarak diğer yüzde meydana gelen aşırı ısınmanın önüne geçilmiştir (Şekil 6.12).

Peltier elemanı bilgisayar fanına 90° açı ile termal macun kullanılarak yapıştırılmış ve üzerinde su toplama denemesi gerçekleştirilecek olan yüzey de Peltier elemanı üzerine yine 90°'lik açı ile dik olarak plastik lastikler yardımıyla sabitlenmiştir. Yüzey üzerinde toplanan su daha öncede darası bilinen polistiren petride toplanmıştır ve deneme sonrasında toplanan suyun ağırlığı tartılarak tespit edilmiştir. Peltier elemanı kullanılarak yapılan denemeler genellikle %92 nem ve 25°C sıcaklık koşullarında gerçekleştirilmiş olup deneme süresince doğru akım kaynağından Peltier elemanına 4,5 V gerilim ve 1,15 A akım beslenmiştir (Şekil 6.12).



Şekil 6.12. Kondensasyonla polistiren petride toplanan suyu belirlemek için Peltier elemanı ile kurulan sistem (soldaki) ve bakır üzerine kaplanmış PPPE polimer yüzeyi üzerinden su toplanması (sağdaki).

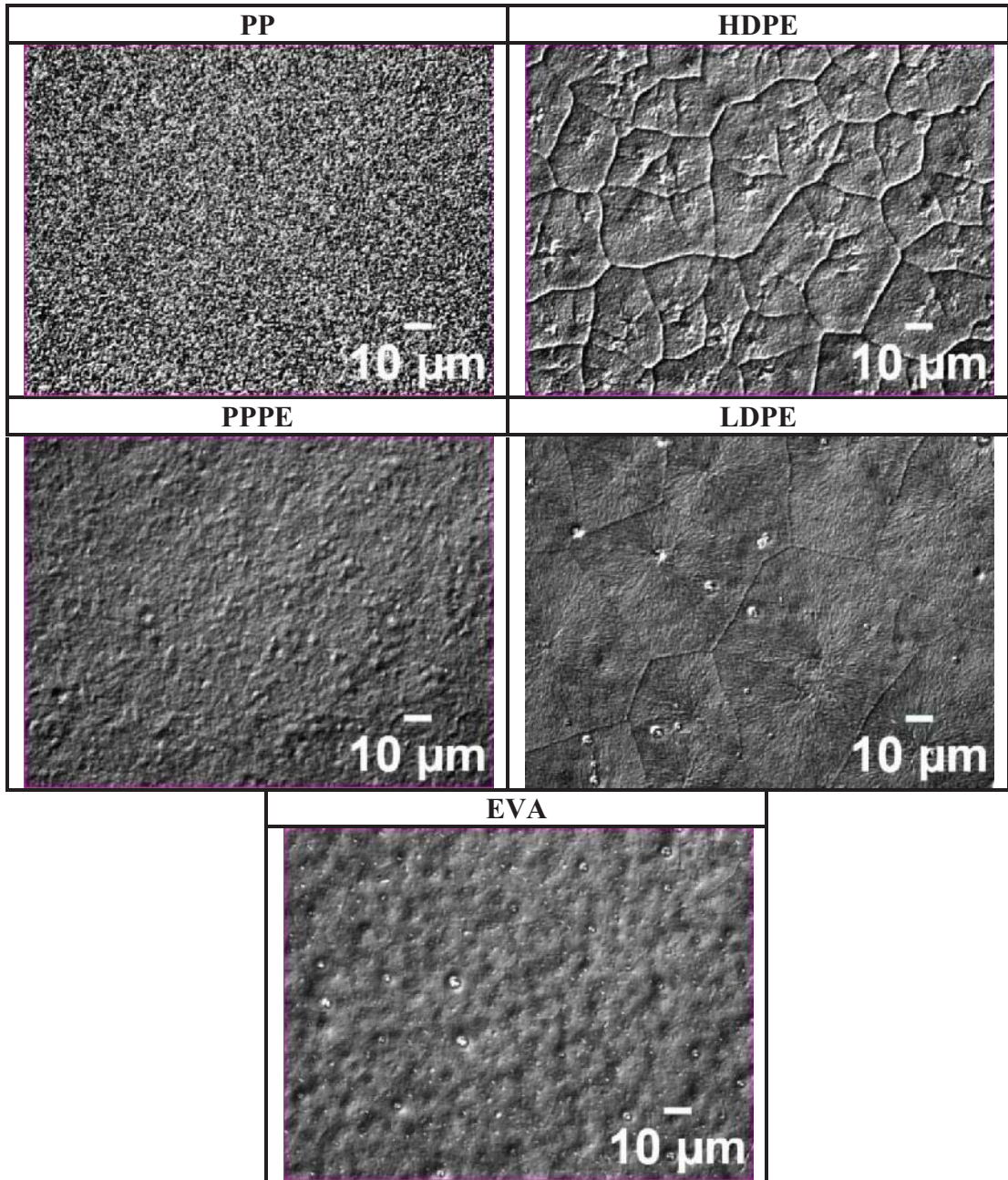
7. BULGULAR

7.1. Sabit %63 Bağıl Nemde Çiğlenme Sıcaklığının Hemen Altındaki Yüzey Üzerinde Damlacık Kondensasyonunun İncelenmesi

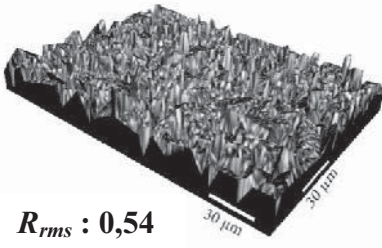
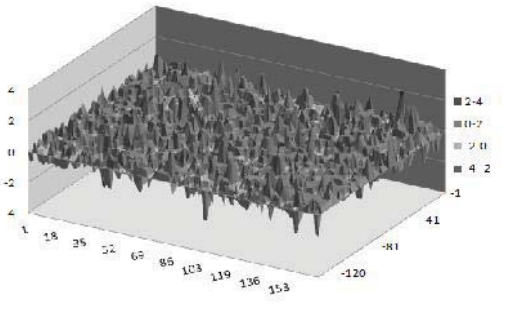
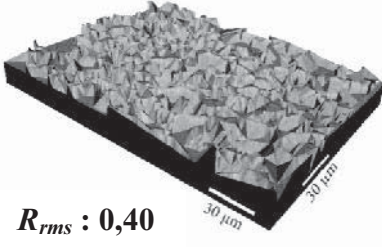
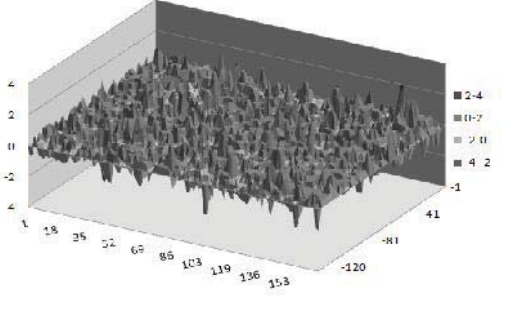
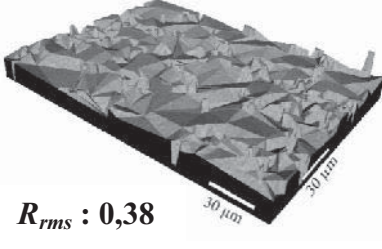
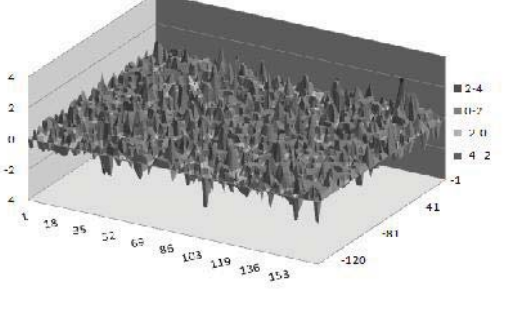
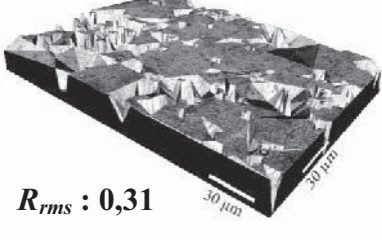
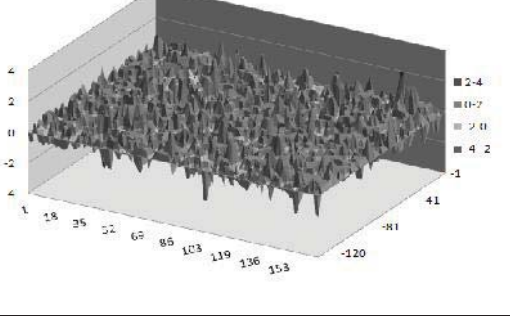
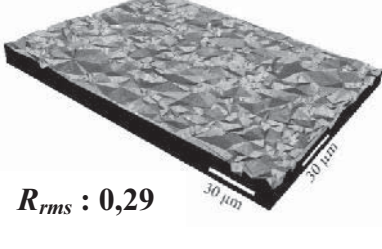
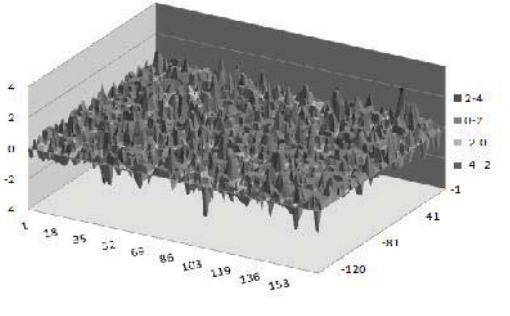
Çalışmanın bu kısmında atmosferik ortamda %63 sabit bağıl nemde, çiğlenme sıcaklığının hemen altında, yoğunlaşan damlacıkların ilk oluştuğu ve difüzyonla büyüdüğü aşamalarda yüzey özelliklerinin damlacık kondensasyonu üzerine olan etkisi incelenmiştir.

7.1.1. Polimer Yüzeylerin Karakterizasyonu

Polimer yüzey olarak polipropilen (PP), yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE), %12 polietilen içerikli polipropilen polietilen siklik olefin kopolimer (PPPE), düşük yoğunluklu polietilen (LDPE) ve %12 vinil asetat içerikli etilen vinil asetat kopolimer (EVA) olmak üzere 5 farklı tipte polimer yüzey kullanılmıştır. Bu yüzeylerin 500x büyültmede çekilen iki boyutlu (2D) optik mikroskop görüntüleri Şekil 7.1’de verilmektedir. Şekil 7.1’den görüldüğü üzere 2-12 mikron boyutta yüzey pürüzlülüğüne sahip PP yüzeyi sahip olduğu semi kristalin yapıyla poliolefinler arasında en pürüzlü yüzeydir. HDPE yüzeyi boyutları 30-60 mikron arasında değişen büyük sferoid yapılardan oluşmakta ve bu sferoidlerin merkezlerinde 2-5 mikron boyutlarında nanofibril yapılar bulunmaktadır. LDPE ve EVA yüzeyler diğer yüzeylere nazaran daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahiptirler. LDPE polimeri yüzeyinde 50-80 mikron boyutlarında sferoid yapılar içermektedir. EVA polimeri yüzeyi ise 2-6 mikron boyutunda ufak çıkıntılar içermekte ancak bunların arası çok açık olduğundan diğer poliolefin yüzeylere kıyasla daha düz bir yüzey görüntüsü sergilemektedir. PPPE polimerinin yüzeyi de orta derecede bir pürüzlülük ihtiva etmektedir. Yüzeylerin 500x büyültmede yüzey profilometresi kullanılarak çekilen 3D profil görüntüleri Şekil 7.2’de verilmektedir.



Şekil 7.1. Polimer yüzeylerin 500x büyültmede çekilen 2D optik mikroskop görüntüleri.

PP	 $R_{rms} : 0,54$	
HDPE	 $R_{rms} : 0,40$	
PPPE	 $R_{rms} : 0,38$	
LDPE	 $R_{rms} : 0,31$	
EVA	 $R_{rms} : 0,29$	

Şekil 7.2. Polimer yüzeylerin 500x büyültmede çekilen 3D yüzey profilleri.

Yüzey profilometresinden elde edilen pürüzlülük değerleri ortalama karekök

pürüzlülük, $R_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2}$, ortalama pik profil yüksekliği,

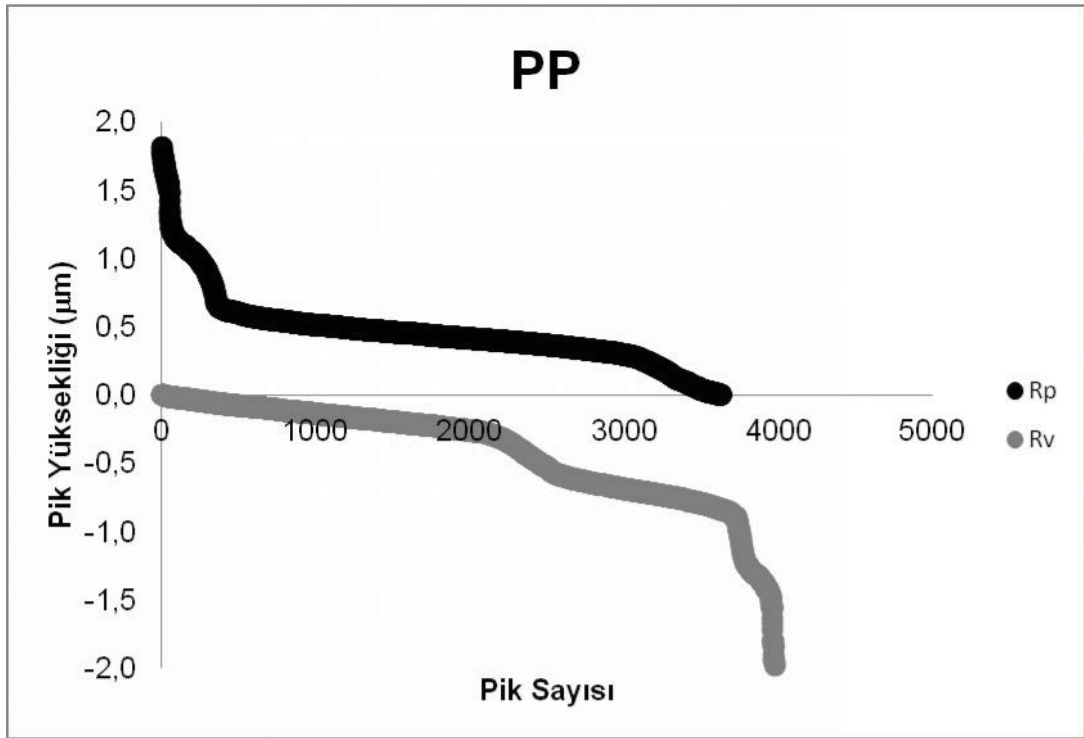
$R_{p\ ortalama} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|_{pik}}$, ortalama pik profil genişliği, $R_{v\ ortalama} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|_{çukur}}$ ve

ortalama toplam pik yüksekliği, $R_{t\ ortalama} = R_{p\ ortalama} + R_{v\ ortalama}$ değerleri olarak Çizelge 7.1’de verilmektedir.

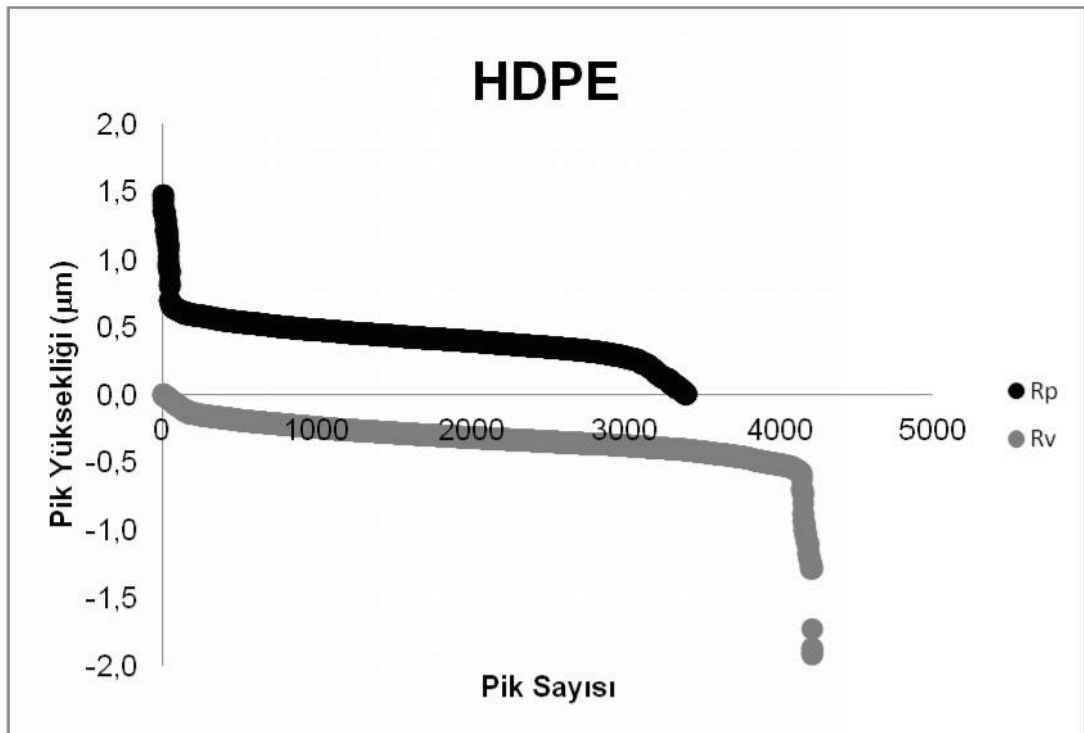
Çizelge 7.1. Poliolefin yüzeylerin R_{rms} , $R_{p\ ortalama}$, $R_{v\ ortalama}$ ve $R_{t\ ortalama}$ pürüzlülük değerleri.

Polimer	R_{rms}	R_p <i>ortalama</i>	R_v <i>ortalama</i>	R_t <i>ortalama</i>
PP	0,54	0,46	-0,42	0,88
HDPE	0,40	0,42	-0,33	0,75
PPPE	0,38	0,31	-0,27	0,58
LDPE	0,31	0,20	-0,24	0,44
EVA	0,29	0,19	-0,26	0,45

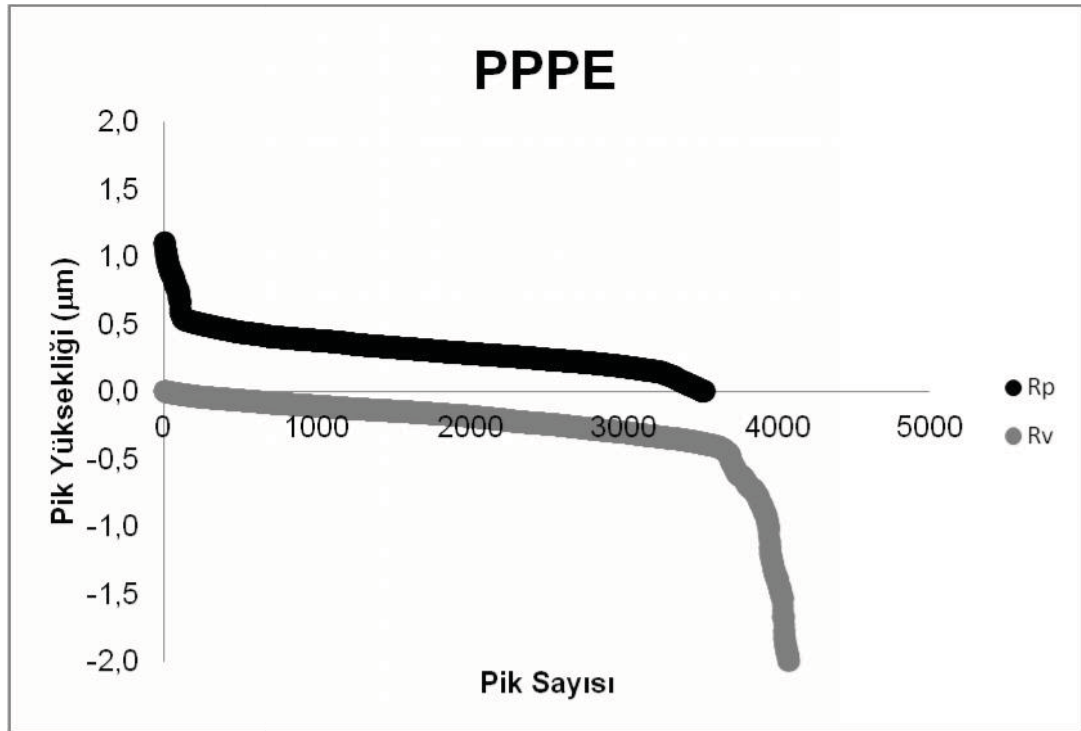
Pürüzlülük profilini oluşturan datalar (n) sayıda sıralı ve birbirine eşit uzaklıktaki noktalardan meydana gelmekte olup, (y_i) ana çizgiye (tabana) olan dikey mesafedir. Çizelge 7.1’den de anlaşıldığı üzere poliolefin yüzeylerin pürüzlülük sıralaması PP>HDPE>PPPE>LDPE>EVA şeklinde değişmektedir. Şekil 7.3 (a-e), her polimer yüzeye ait ortalama R_p ve R_v değerlerini hesaplamak için polimer yüzeylerdeki pik sayısına karşı çizilen pik yüksekliği değerlerini göstermektedir.



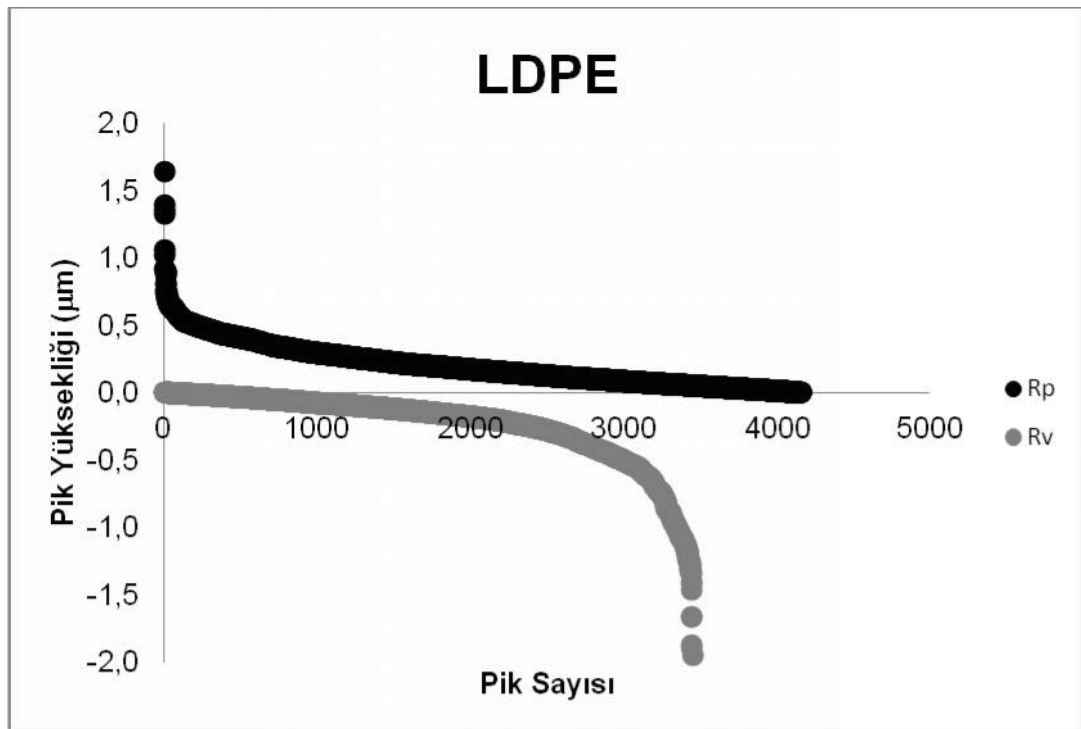
Şekil 7.3. (a)



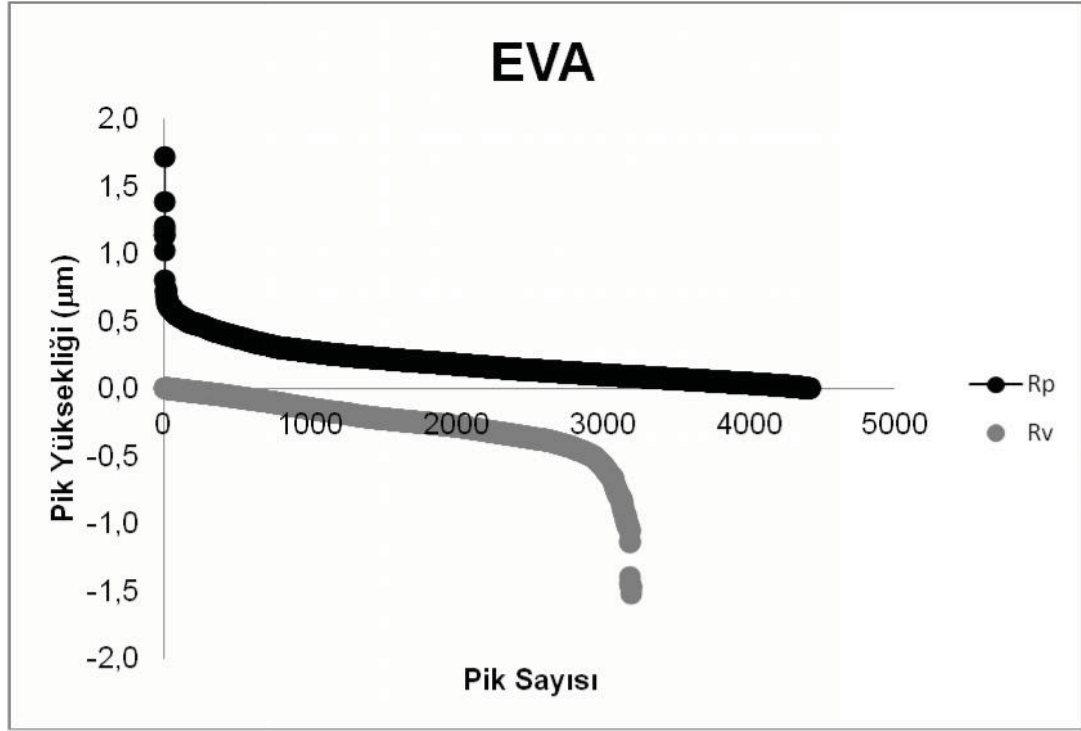
Şekil 7.3. (b)



Şekil 7.3. (c)



Şekil 7.3. (d)



Şekil 7.3. (e)

Şekil 7.3. (a) PP, (b) HDPE, (c) PPPE, (d) LDPE ve (e) EVA polimer yüzeylerindeki pik yüksekliklerinin pik sayıları ile değişimi.

R_p ve R_v değişimini gösteren bu grafiklerden LDPE ve EVA yüzeylerin PP, HDPE ve PPPE yüzeylerinden çok daha düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğu açıkça görülmektedir. Birim alan başına düşen pik popülasyonunun en yüksek olduğu yüzey PP yüzeydir (Şekil 7.2). Bu durum PP yüzeyin polimer yüzeyler arasında en pürüzlü yüzey olduğunu doğrulamaktadır.

Yüzeylerin su damlası ile vermiş olduğu θ_e , θ_a , θ_r , CAH ve WH değerleri Çizelge 7.2’de verilmekte olup θ_e , θ_a , CAH ve WH değerleri yüzeylerin sahip olduğu R_{rms} pürüzlülük değerleri değişimi ile paralel bir trend göstermektedir. Yani yüzey pürüzlülüğü artışı ile θ_e , θ_a , CAH ve WH değerleri artmaktadır. Bu beklenen bir durumdur çünkü yüzey pürüzlülüğü temas açısı karmaşasının bağlı olduğu ana etmenlerden biridir [Erbil, 2006]. Temas açısı karmaşası iki önemli etmenden önemli derecede etkilenir. Bunlardan biri yüzey pürüzlülüğü diğeri ise yüzeyin sahip olduğu kimyasal heterojenliktir. Poliolefin yüzeylerde kimyasal heterojenlik etkisi düşük olduğundan (burada sadece PPPE ve EVA yüzeyler için kısmen kimyasal heterojenlik söz konusudur) temas açısı karmaşasındaki değişim yüzey

pürüzlülüğünden ön planda etkilenmektedir. Bu nedenle en pürüzlü yüzey olan PP yüzeyde temas açısı karmaşası değeri en büyüktür.

Çizelge 7.2. Polimer yüzeylerin θ_a , θ_e , θ_r temas açıları ile CAH ve WH değerleri.

Polimer	θ_a	θ_e	θ_r	CAH	WH
PP	123	116	78	45	54,8
HDPE	112	107	77	35	43,6
PPPE	107	105	83	24	30,2
LDPE	105	101	89	16	20,1
EVA	95	93	84	11	14

Yüzeylerin serbest yüzey enerjisi değerlerinin belirlenmesinde kullanılan metilen iyodür, alfa bromonaftalen, formamid ve etilen glikol damlalarının bu yüzeyler üzerinde verdiği temas açısı değerleri Çizelge 7.3'te verilmektedir. Serbest yüzey enerjisi hesabında literatürdeki diğer metotlardan üstün olan, hem hidrojen ve hem de dispersif etkileşimleri hesaba alan van-Oss-Good metodu kullanılmıştır [Good, 1993; van Oss et al. 1988]. Polimer yüzeylerin van-Oss-Good metodu kullanılarak belirlenen γ_s^{LW} , γ_s^+ , γ_s^- ve γ_s^{tot} değerleri Çizelge 7.3'te verilmektedir.

Çizelge 7.3. Test sıvılarının polimer yüzeyler üzerinde verdiği denge temas açısı (θ_e) değerleri ve van Oss-Good metoduna göre hesaplanan serbest yüzey enerjisi parametreleri.

Polimer	MeI_2 θ	$Br-Naph$ θ	$Form$ θ	EG θ	γ_s^{LW}	γ_s^+	γ_s^-	γ_s^{tot}
PP	59	45	76	74	31,1	0,03	0	31,1
HDPE	54	41	83	68	33,5	0,06	0	33,5
PPPE	56	52	88	77	30,2	0	0,07	30,2
LDPE	49	27	82	74	31,3	0	0,44	31,3
EVA	48	30	73	67	37,4	0	1,38	37,4

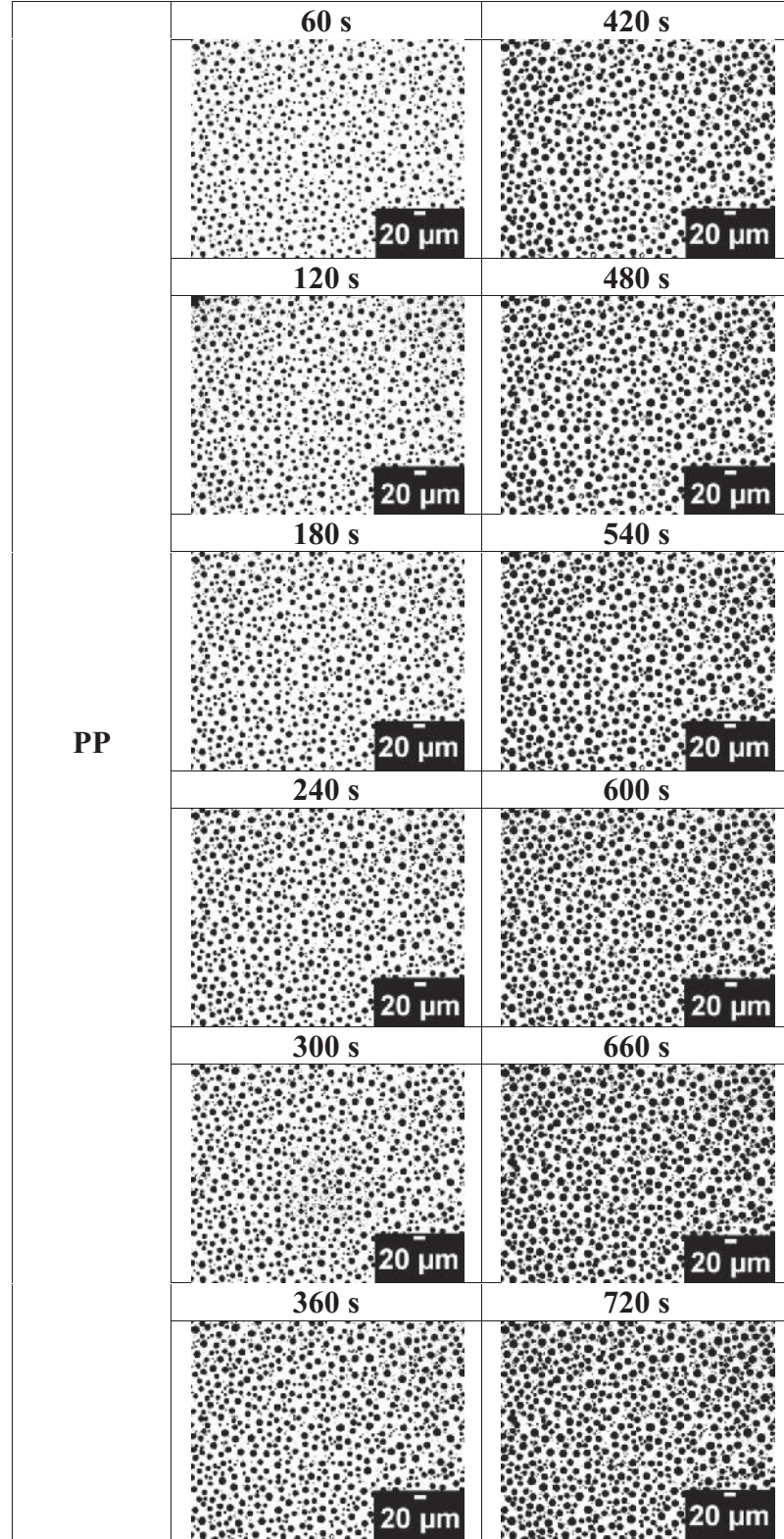
Bu çizelgeden de görüldüğü üzere polimer yüzeylerin serbest yüzey enerjisi değerleri 30-37 mJ/m² gibi dar bir aralıkta değişmektedir. Eğer sahip olduğu asetat gruplarından kaynaklanan kısmen polar karaktere sahip EVA yüzeyi ayrı tutarsak serbest yüzey enerjisi aralığı 30-34 mJ/m² aralığında değişerek aralık daha da daralmakta ve yüzeylerimiz için serbest yüzey enerjisi değerleri neredeyse sabit olmaktadır. Buna karşın daldırarak kaplama sırasında meydana gelen faz segregasyonundan [Erbil et al., 2003; Ucar et al., 2010; Ucar et al., 2011; Doganci et al., 2012] dolayı pürüzlülük artmakta ve temas açısı histeresisi değerleri EVA yüzey hariç tutulursa 3 kat (16° ile 45° arasında), EVA yüzeyi de dahil edilirse 4 kat (11° ile 45° arasında) aralıkta değişmektedir. Serbest yüzey enerjisi değerleri birbirine yakın bu yüzeylerde temas açısı kamaşası değerlerinin farklı olması asıl hedefimiz olan damla kondensasyonunda temas açısı karmaşası etkisinin incelenmesi açısından kolaylık sağlamaktadır.

7.1.2. Çiğlenme Sıcaklığının Hemen Altında Meydana Gelen Damlacık Kondensasyonunun Yüzey Özellikleri ile İlişkilendirilmesi

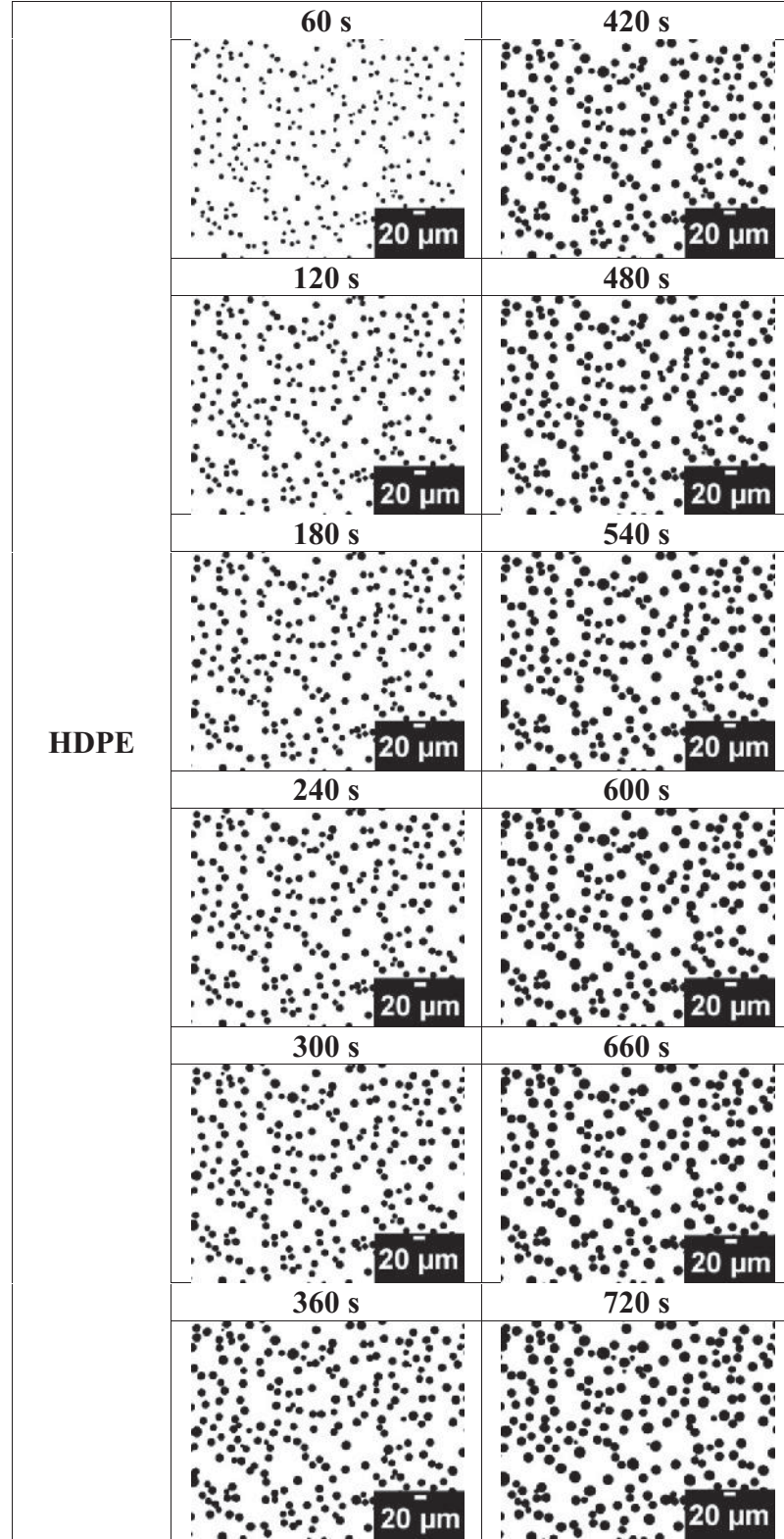
Polimerik yüzeyler üzerinde çiğlenme sıcaklığının hemen altında gerçekleştirilen denemeler atmosferik ortamda %63 bağıl nemde ve 26,5°C oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Bu koşullar için çiğlenme noktasının 18,89°C olduğu termodinamik tablolardan yararlanarak çiğlenme noktası hesabı yapan bir program vasıtasıyla tespit edilmiştir. Cama kaplanmış polimer yüzeylerin deneme öncesinde arka tarafları kazılarak temizlenmiş ve termal direnç oluşturmaması için kaplama kalıntısının kalmamasına dikkat edilmiştir. Bu yüzeylerde çiğlenme noktasının hemen altında kondensasyon meydana gelebilmesi için su sirkilatörü 17°C'ye sabitlenmiştir. Soğutucu ortam olarak görev yapacak %99,9 elektrolitik bakırdan imal edilen bakır hücre ile polimer kaplı cam slaytların arasında oluşacak olan termal direnci minimuma indirmek için deneme öncesinde araya ince bir su filmi sürülmektedir. Deneme sırasında ölçülen yüzey sıcaklığı 19°C olarak tespit edilmiştir ve denemeler sonlanana kadar odanın %63 bağıl nemde sabit kaldığına emin olmak için kondense olan yüzeye yakın tutulan higrometrenin probunun bağlı olduğu bağıl nem göstergesi sürekli olarak takip edilmiştir. PP, HDPE, PPPE, LDPE ve EVA polimer yüzeyleri üzerine bu koşullarda kondense olan damlaların üstten (plan)

görüntüleri optik mikroskop aracılığı ile 200x büyültmede 1'er dakika ara ile 12 dk (720 s) boyunca fotoğraflanmıştır. Daha sonra bu fotoğraflar Adobe Photoshop CS5, Image J ve UHTSCSA şekil analiz programları kullanılarak siyah-beyaz (binary) forma dönüştürülmüş olup elde edilen damla fotoğrafları her bir yüzey için 1'er dakika ara ile Şekil 7.4-7.8'de verilmektedir.

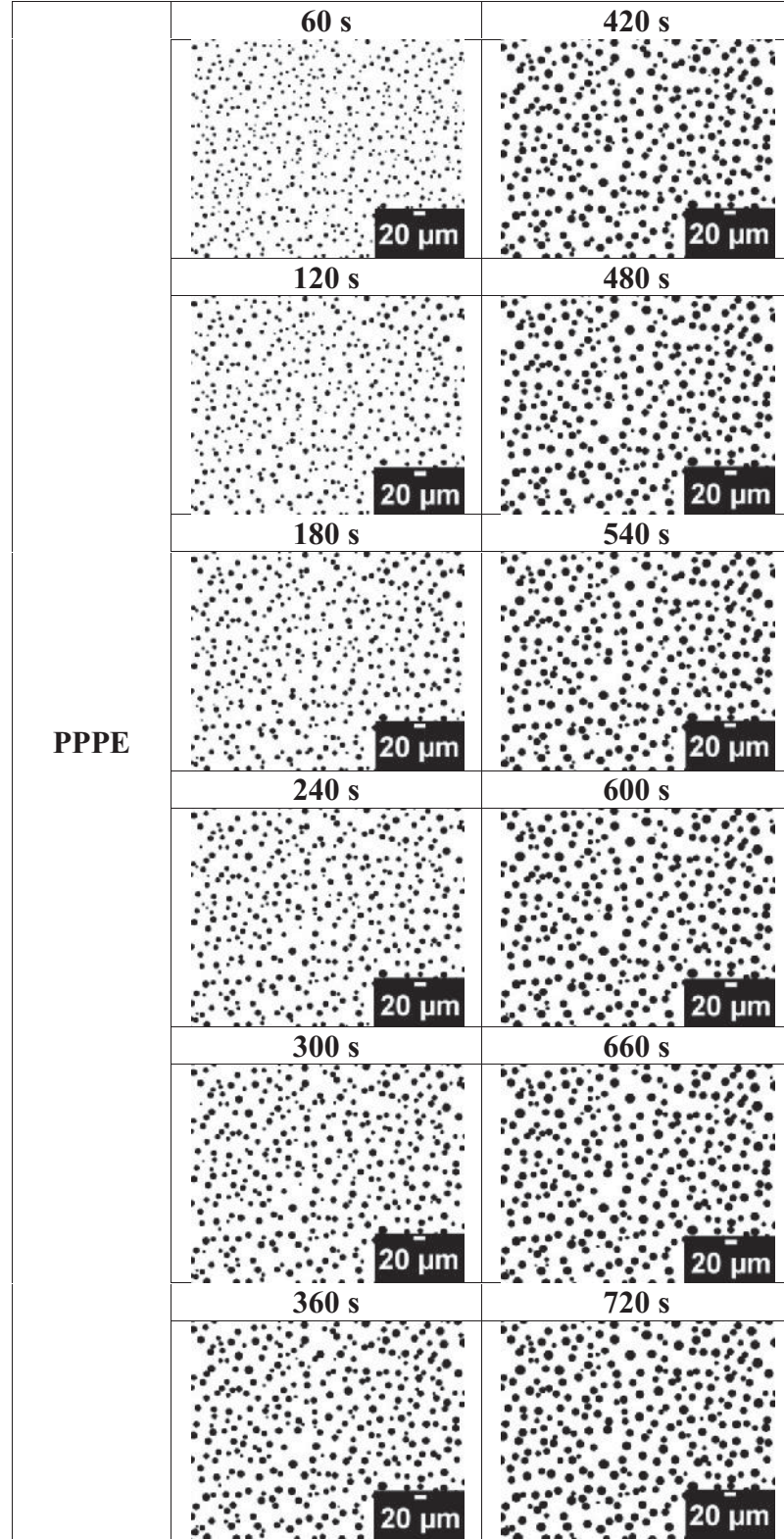
Şekil 7.4-7.8'den görüldüğü üzere polimer yüzeyler üzerine kondense olan damla sayıları, damla büyüklükleri ve bu damlaların büyüme hızları polimerden polimere farklılık göstermektedir. Temas açısı değeri PP, HDPE ve PPPE yüzeylere nazaran daha düşük olan LDPE ve EVA yüzeylere kondense olan damlaların çapları daha büyüktür. Çünkü kondense olan su damlası bu yüzeylerde daha fazla yayılmaktadır.



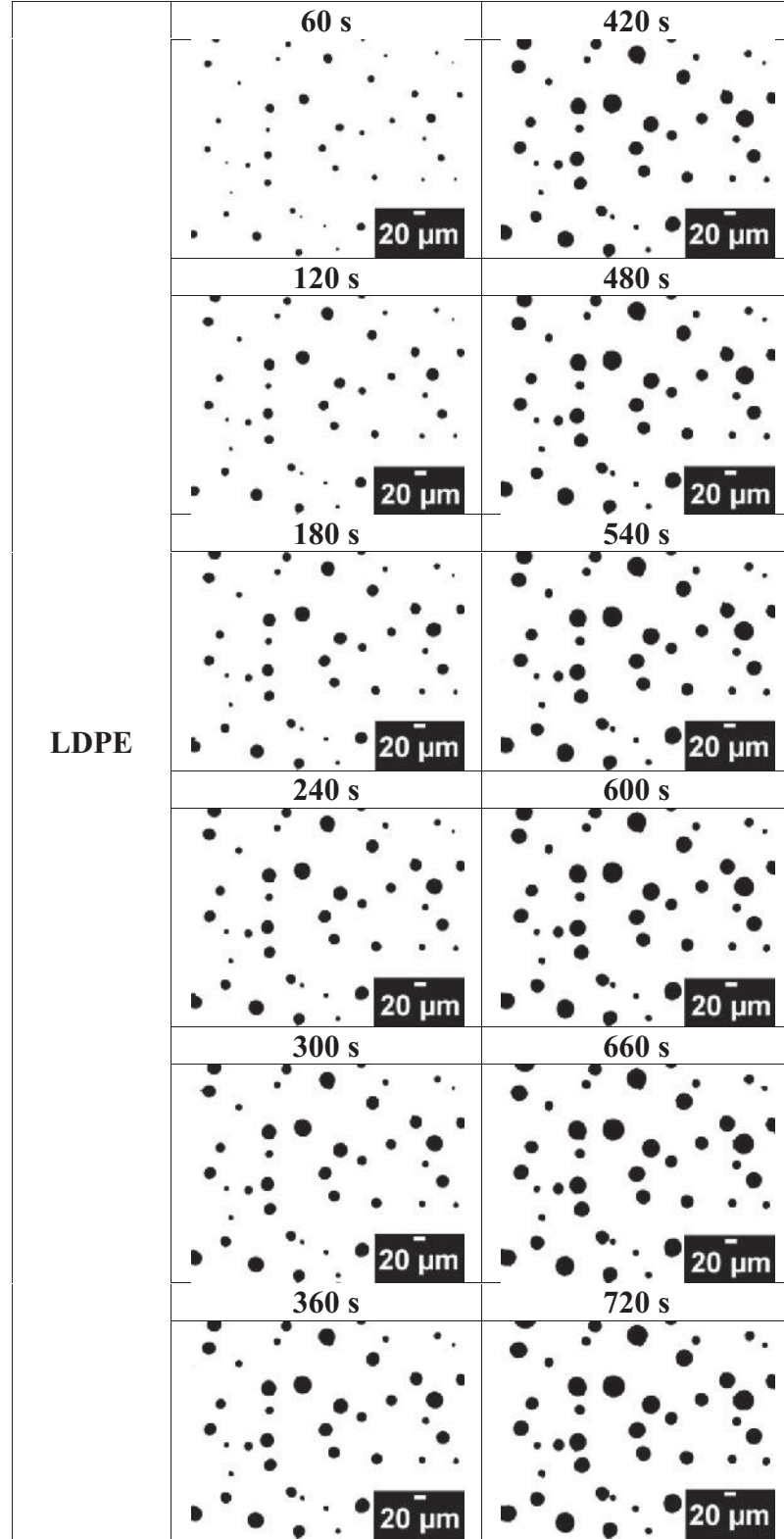
Şekil 7.4. PP yüzeyde %63 bağıl nemde kondense olmuş damlalar.



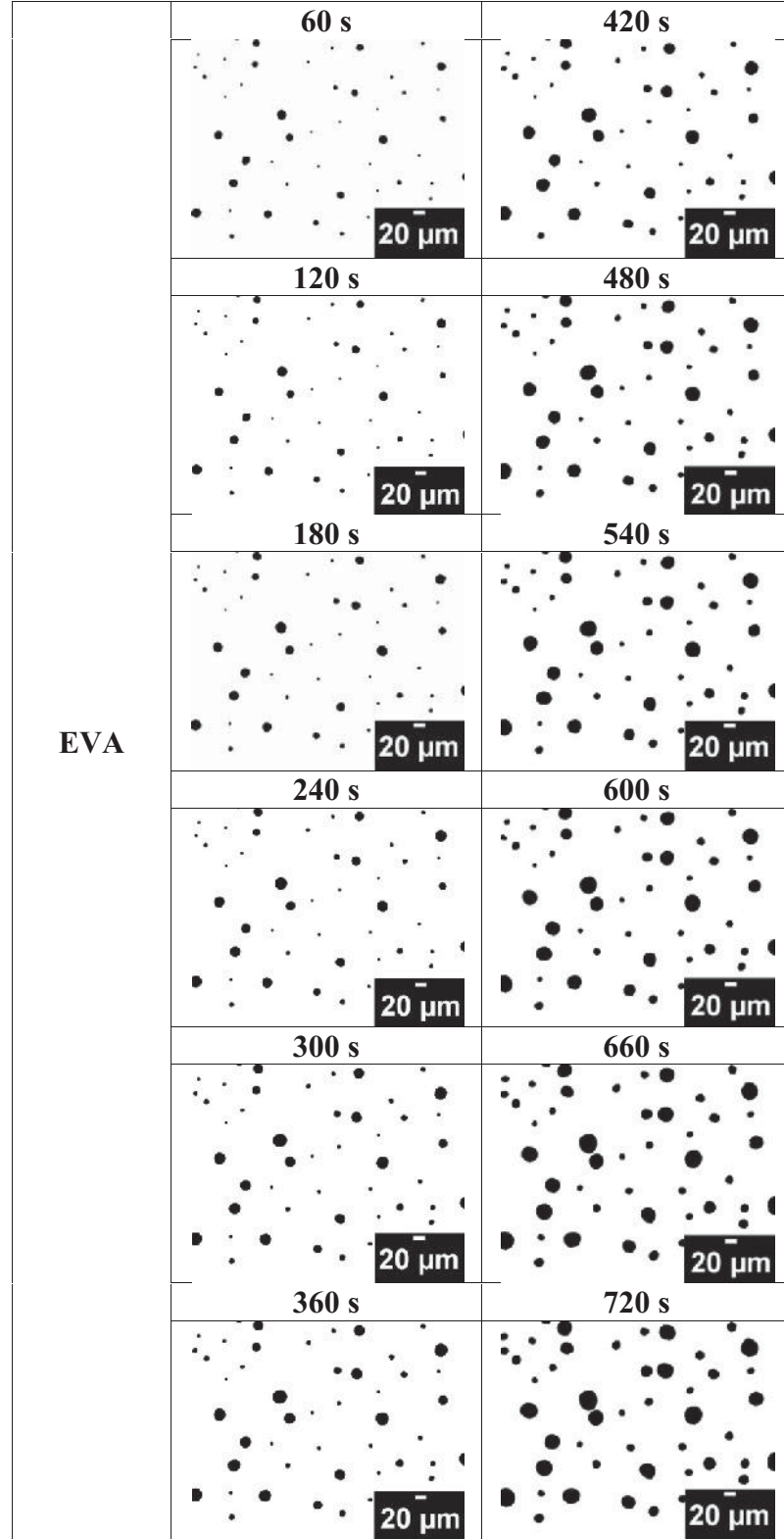
Şekil 7.5. HDPE yüzeyde %63 bağıl nemde kondense olmuş damlalar.



Şekil 7.6. PPPE yüzeyde %63 bağıl nemde kondense olmuş damlalar.



Şekil 7.7. LDPE yüzeyde %63 bağıl nemde kondense olmuş damlalar.



Şekil 7.8. EVA yüzeyde %63 bağıl nemde kondense olmuş damlalar.

Polimer yüzeyler üzerine kondense olan damlaların meydana getirdikleri yüzey kaplama oranı (siyah alanların toplamının beyaz alana oranıdır ve UHTSCSA şekil analiz programı kullanılarak belirlenmiştir) % değer olarak Çizelge 7.4'te verilmektedir. Hem Çizelge 7.4'ten ve hem de Şekil 7.4- 7.8'den görüldüğü üzere tüm polimer yüzeyler için damlaların yüzey kaplama oranının kondensasyon süresince zamana bağlı olarak giderek arttığı ve kondense olan damlaların büyüme hızlarının yüzeyden yüzeye değiştiği görülmektedir. Denemelere 12 dakika (720 s) boyunca devam edilmiştir çünkü 12 dakika sonra özellikle PP, HDPE ve PPPE yüzeylerde yüzeyler damlalarla kaplanmaktadır ve eğer kondensasyona devam edilecek olursa damlalar arasında birleşme hızlanmakta ve kondensasyon prosesine damla birleşmesi hakim olmaktadır.

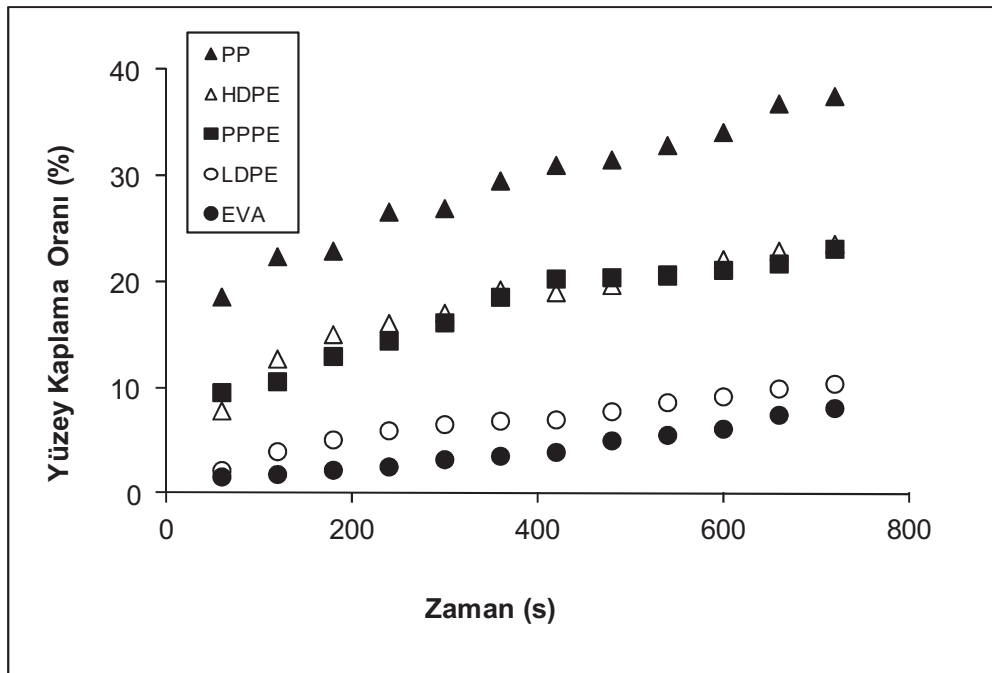
Çizelge 7.4. %63 bağıl nemde, polimer yüzeyler üzerine kondense olan damlaların yüzey kaplama oranının zamanla değişimi.

Zaman (s)	PP	HDPE	PPPE	LDPE	EVA
60	18,63	7,87	9,60	2,24	1,64
120	22,43	12,77	10,63	4,02	1,87
180	22,97	15,08	13,01	5,13	2,27
240	26,65	16,13	14,46	5,99	2,58
300	26,99	17,10	16,20	6,58	3,26
360	29,59	19,31	18,60	6,90	3,59
420	31,06	19,05	20,32	7,03	3,95
480	31,57	19,72	20,46	7,79	5,04
540	32,93	20,61	20,71	8,65	5,56
600	34,16	22,16	21,15	9,20	6,14
660	36,87	22,95	21,75	9,94	7,46
720	37,57	23,59	23,14	10,39	8,09

720 saniye sonunda polimer yüzeylere kondense olan damlaların yüzey kaplama oranı %8-%38 arasında değişmekte olup (Çizelge 7.4) literatürde denge değeri olarak tanımlanan %50-%55 aralığından düşüktür [Fritter et al. 1981; Briscoe and Galvin, 1981; Briscoe and Galvin, 1981; Zhao and Beysens, 1995]. Ancak bu çalışmalarda çiğlenme noktasından çok uzak koşullarda çalışılmakta ve kondense

olan damlaların büyümesi ile birlikte birleşmeleri de incelenmektedir. Burada ise %63 sabit bağıl nem ortamında damlacıkların ilk oluştuğu (çekirdeklendiği) ve sonrasında su buharının difüzyonuyla büyüdüğü aşamalar (damla birleşmesinin ihmal edilebilir düzeyde olduğu koşullar) incelenmiş ve bunu rahat takip edebilmek içinde yavaş kondensasyonun olduğu çiğlenme sıcaklığının hemen altında çalışılmıştır. Damla kondensasyonunun bizim çalıştığımız difüzyon kontrollü damla büyümesi kısmında yüzey kaplama oranlarının düşük değerlerde seyretmesi literatürde pek çok çalışmada bahsedilmektedir [Beysens and Knobler, 1986; Briscoe and Galvin, 1991; Beysens, 1995; Beysens, 2006].

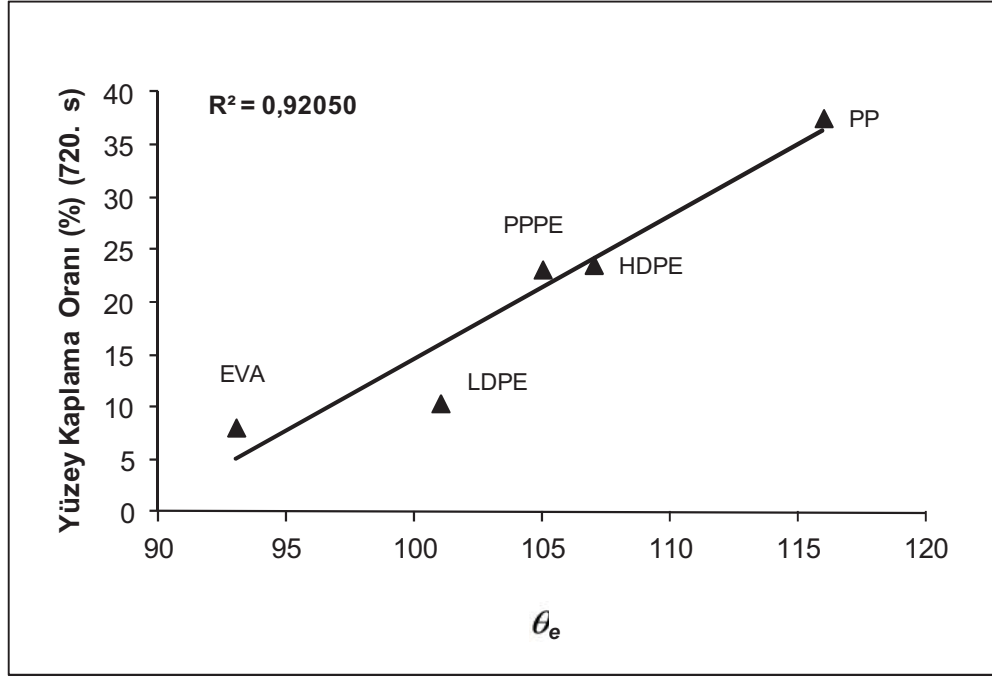
%63 bağıl nemde polimer yüzeylerde meydana gelen yüzey kaplama oranının zamanla değişimi Şekil 7.9’da verilmektedir.



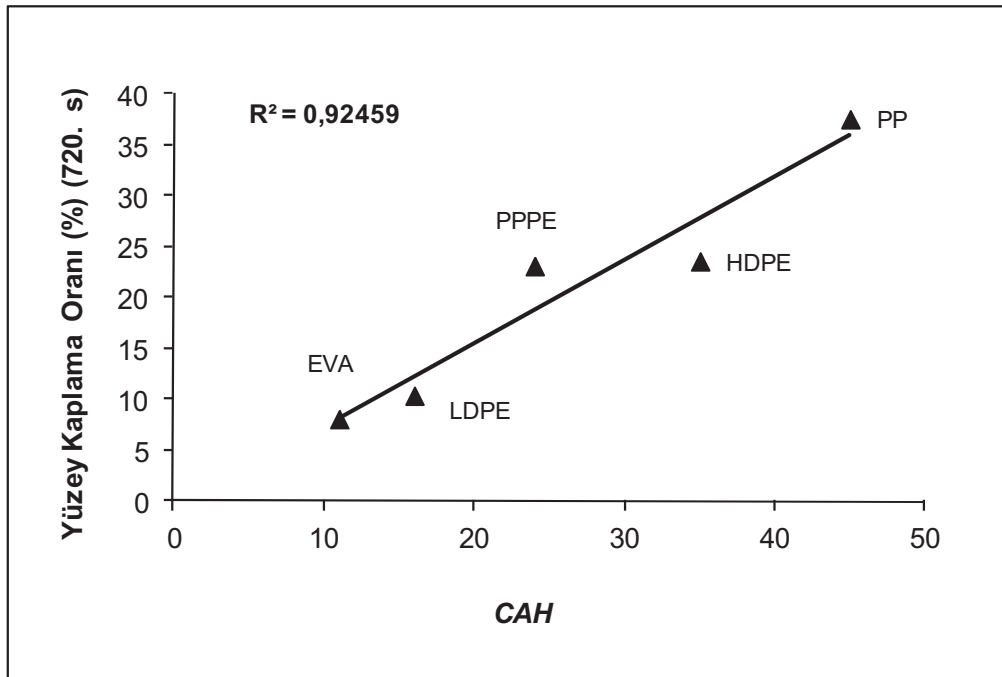
Şekil.7.9. %63 bağıl nemde, polimer yüzeylerde meydana gelen yüzey kaplama oranının zamanla değişimi.

Şekil 7.9’den görüldüğü üzere yüzey kaplama oranı, en pürüzlü olan PP yüzeyde en yüksek, yüzey pürüzlülüğünün daha düşük olduğu LDPE ve EVA yüzeylerde en düşüktür. Polimer yüzeylerde meydana gelen yüzey kaplama oranı damla yoğunlaşmasının pek çok adımı için R_{rms} , θ_e , CAH ve WH değişimlerinde olduğu gibi (Çizelge 7.1 ve 7.2) $PP > HDPE > PPPE > LDPE > EVA$ sırasında değişmektedir.

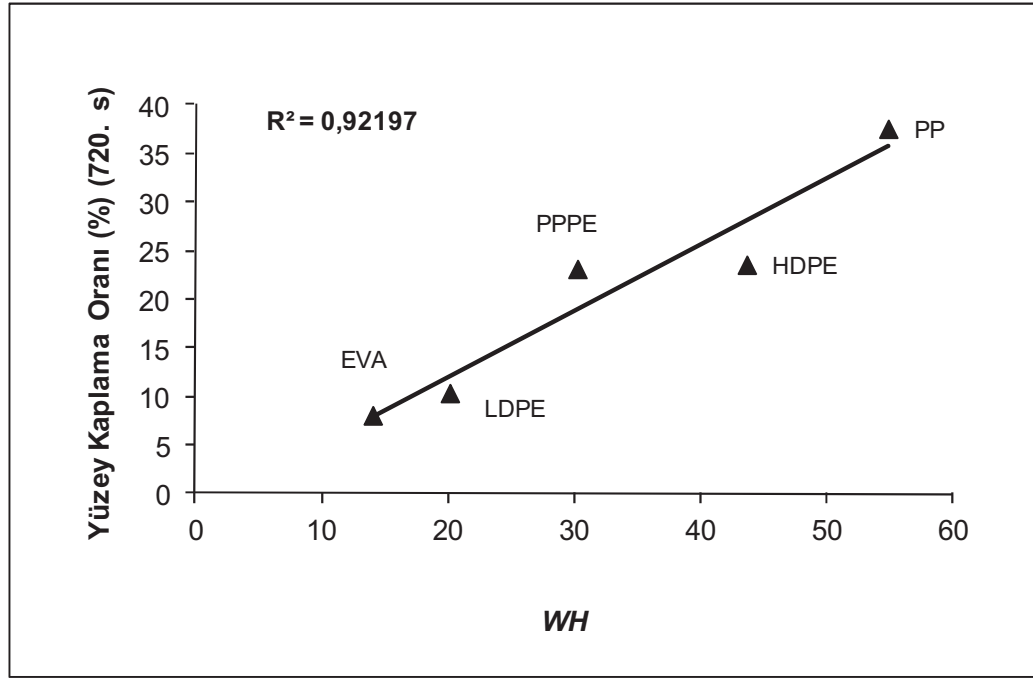
Polimer yüzeylerde 720. saniyenin sonunda meydana gelen yüzey kaplama oranının temas açısı, temas açısı karmaşası, ıslatılabilirliğin karmaşası, yüzey pürüzlülüğü ve serbest yüzey enerjisi ile değişimi Şekil 7.10 (a-e)'de gösterilmektedir.



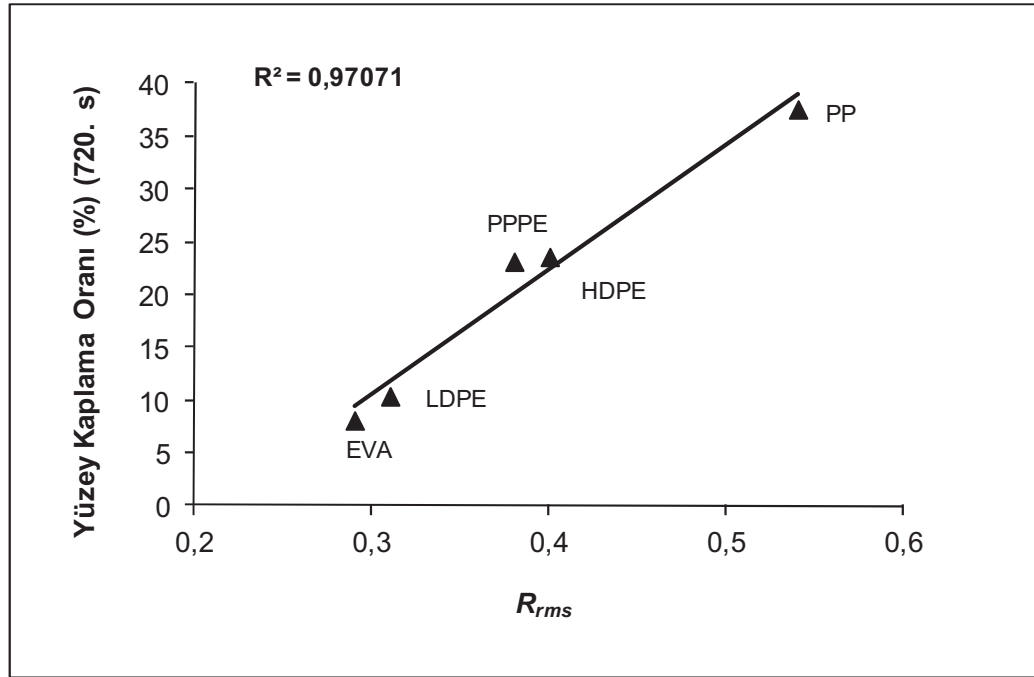
Şekil.7.10. (a)



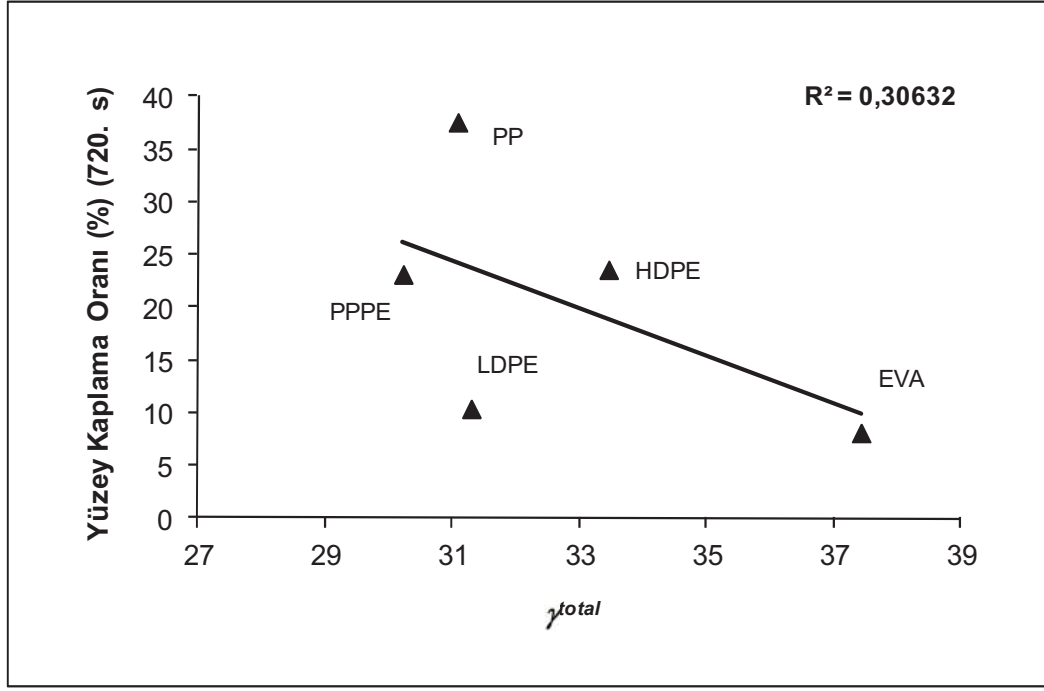
Şekil.7.10. (b)



Şekil.7.10. (c)



Şekil.7.10. (d)



Şekil.7.10. (e)

Şekil.7.10. %63 bağıl nemde, polimer yüzeylerde 720. s’de meydana gelen yüzey kaplama oranının (a) su temas açısı (θ_e), (b) temas açısı karmaşası (CAH), (c) ıslatılabilirliğin karmaşası (WH), (d) yüzey pürüzlülüğü (R_{rms}), (e) serbest yüzey enerjisi (γ^{total}) ile ilişkisi.

Bu grafiklerden de görüldüğü üzere polimer yüzeylerde 720. saniyenin sonunda meydana gelen yüzey kaplama oranı temas açısı, temas açısı karmaşası, ıslatılabilirliğin karmaşası ve yüzey pürüzlülüğü ile lineer olarak değişmekte ve bu değerlerin artışı ile artmaktadır. Yüzey kaplama oranı temas açısı ve temas açısı karmaşası en yüksek olan PP yüzeyde en yüksekken, temas açısı ve temas açısı karmaşası en düşük olan EVA yüzeyde en düşüktür. Yüzeylerin sahip olduğu temas açısı karmaşasının yüzey kaplama oranında artışa neden olduğu literatürde de bahsedilmektedir [Zhao and Beysens, 1995]. Bununla birlikte, 720. saniyenin sonunda meydana gelen yüzey kaplama oranı yüzeylerin sahip olduğu pürüzlülük ile en yüksek korelasyonda bağlılık göstermektedir (Şekil 7.10 (d), R^2 : 0,97). Yüzey pürüzlülüğü ile yüzey kaplama oranı arasındaki ilişki sadece 720 saniye sonunda değil kondensasyon prosesinin her adımında yüksek regresyon katsayısı vermektedir (R^2 : 0,93-0,99 arasında değişmektedir). Buna karşın 720. saniyenin sonunda polimer yüzeylerde meydana gelen yüzey kaplama oranını, polimerlerin sahip olduğu serbest yüzey enerjisi değerlerine karşı grafiğe geçirdiğimizde bu denli yüksek bir

korelasyon elde edilememiştir (Şekil 7.10 (e)). Buradan çalışmış olduğumuz yüzeylerin serbest yüzey enerjisinin damla kondensasyon hızına bir etkisi olmadığı sonucu çıkmaktadır. Ancak bu serbest yüzey enerjisinin damla kondensasyonunda etkili bir parametre olmadığı anlamına gelmez. Serbest yüzey enerjisinin damla kondensasyonunda etkili bir parametre olduğu, serbest yüzey enerjisi düşük yüzeylerde damla kondensasyonunun hızlandığı literatürde pek çok çalışmada rapor edilmektedir [Martó et al. 1986; , Holden et al. 1987; Haraguchi et al. 1991; Lan et al. 2009; Lan et al. 2010]. Bizim çalışmamızda bu sonucun elde edilmesinin nedeni çalışılan serbest yüzey enerjisi aralığının dar olmasından kaynaklanmaktadır (30-37 mJ/m²).

Yüzey kaplama oranının yüzey özellikleri ile ilişkisini incelediğimizde en etkin parametrenin yüzey pürüzlülüğü olduğunu görüyoruz. Temas açısı karmaşası ve ıslatılabilirliğin karmaşası da kimyasal olarak homojen veya kısmen heterojen yüzeylerin pürüzlülüğüne bağlı olduklarından bu parametrelerle de iyi bir korelasyon elde edilmektedir.

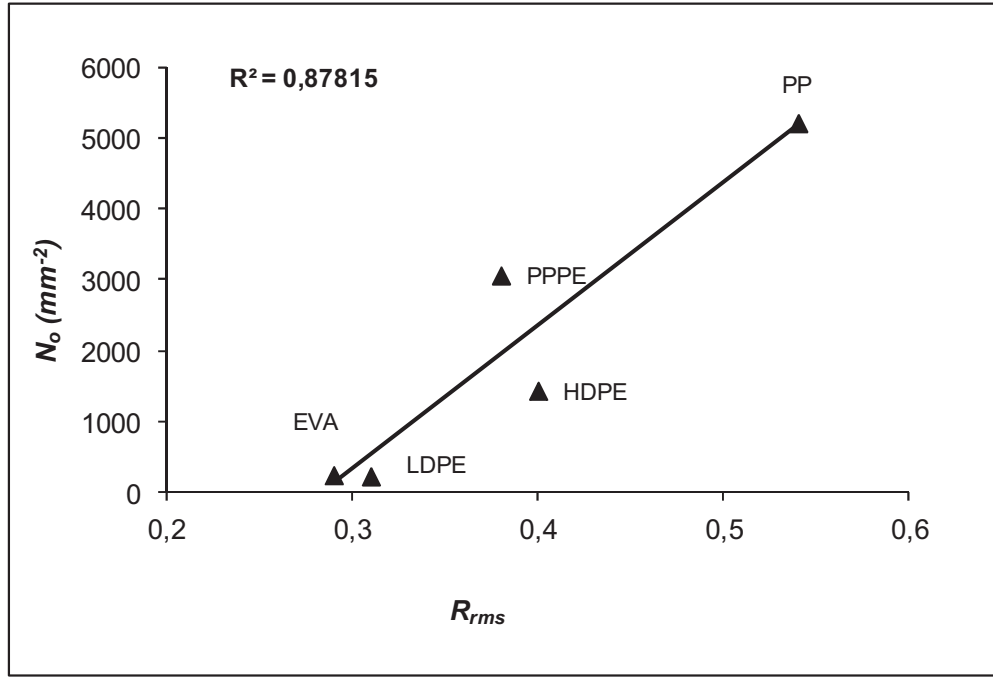
7.1.3. Birim Alan Başına Kondense Olan Damlacık Sayısı ile Yüzey Özelliklerinin İlişkilendirilmesi

Bir yüzey üzerine birim alan başına kondense olan damlaların sayısı o yüzeyin sahip olduğu yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır. Şekil 7.4-7.8'den de görüldüğü üzere en yüksek temas açısı karmaşası değerine sahip en pürüzlü yüzey olan PP yüzeyde kondensasyonun başlamasıyla çok sayıda minik damla yüzey üzerinde çekirdeklenmekte ve büyümeye başlamaktadır. Buna karşın düşük temas açısı karmaşası değerine sahip daha pürüzsüz yüzeyler olan LDPE ve EVA yüzeylerde aynı deneysel şartlarda kondensasyon meydana geldiğinde daha büyük damla çapına sahip az sayıda damla kondense olmaktadır. Polimer yüzeylerde birim alan başına kondense olan damla sayısının en pürüzlü olan PP yüzeyde en yüksek, düşük pürüzlülüğe sahip EVA ve LDPE yüzeylerde ise en düşük değerde olduğunu Çizelge 7.5'ten de görmekteyiz. Çizelge 7.5 ayrıca birim alan başına kondense olan damla sayısının zamana karşı değişimini de göstermektedir.

Çizelge 7.5. %63 bağıl nemde, polimer yüzeyler üzerine birim alan başına kondense olan damlaların sayısının zamanla değişimi.

Zaman (s)	PP $N (\text{mm}^{-2})$	HDPE $N (\text{mm}^{-2})$	PPPE $N (\text{mm}^{-2})$	LDPE $N (\text{mm}^{-2})$	EVA $N (\text{mm}^{-2})$
60	5214	1441	3067	236	252
120	5258	1320	2339	236	252
180	5236	1232	2125	230	252
240	5203	1183	2005	219	252
300	5477	1178	1879	225	246
360	5149	1052	1747	219	241
420	4393	1095	1665	214	236
480	4798	1057	1632	214	241
540	4935	1030	1605	214	241
600	5286	953	1523	214	241
660	5209	948	1473	214	236
720	5225	909	1435	214	236

Polimer yüzeylere birim alan başına kondense olan damla sayısını etkileyen en önemli faktör yüzeyin sahip olduğu pürüzlülüktür. Literatürde birim alan başına kondense olan damla sayısının yüzey pürüzlülüğü artışı ile artış gösterdiği belirtilmektedir. Yüzey üzerindeki tepeler, çıkıntılar, hatta deformasyonla meydana gelen çizikler bile kondensasyonun meydana gelmesi için gerekli enerji bariyer değerini düşürerek, birer çekirdek oluşum noktası vazifesi görürler ve kondensasyon meydana geldiğinde damlalar ilk bu noktalarda çekirdeklenecek difüzyonla büyümeye başlarlar [McCormick and Baer, 1965; Patankar, 2010]. Şekil 7.11'den de görüldüğü üzere polimer yüzeylerde başlangıç anında birim alan başına kondense olan damla sayısı (N_o), polimer yüzeylerin pürüzlülüğünün (R_{rms}) artışı ile artmaktadır (R^2 : 0,88).



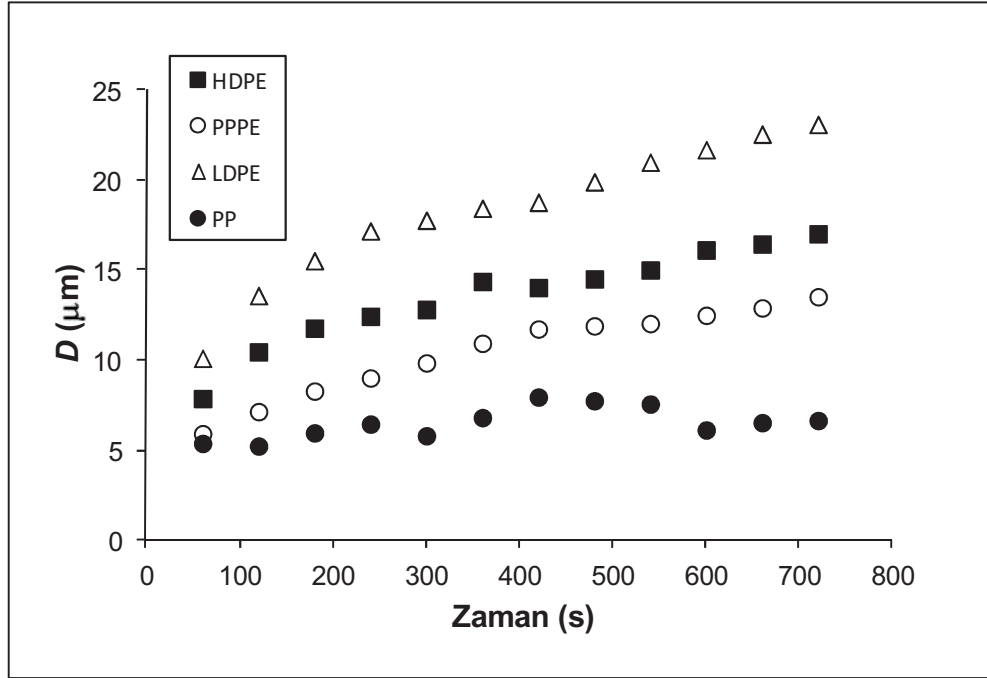
Şekil.7.11. %63 bağıl nemde, polimer yüzeylerde başlangıç anında birim alan başına kondense olan damla sayısının (N_o) polimer yüzeylerin pürüzlülüğü (R_{rms}) ile değişimi.

Bu sonuç, pürüzlü yüzeylerin damla kondensasyonunda damla çekirdeklenmesini tetiklediğini doğrulamaktadır [McCormick, 1965; Patankar, 2010]. PP yüzey, yüzeyinde sahip olduğu tepe ve çıkıntılarla damla kondensasyonuna olanak verecek daha fazla çekirdek nokta içermektedir. Tam tersi durum ise LDPE ve EVA yüzeyler için geçerlidir. Bu durum 3D yüzey profillerinin verildiği Şekil 7.2 ve PP, LDPE ve EVA yüzeyler için pik sayısı ve pik yüksekliklerinin değişiminin verildiği Şekil 7.3 (a,d,e)'den de görülmektedir. PP yüzey maksimum pik sayısına ve dolayısıyla maksimum pürüzlülüğe, LDPE ve EVA yüzeyler ise minimum pik sayısına ve dolayısıyla minimum yüzey pürüzlülüğüne sahiptirler.

PP yüzeye kondense olan damlaların hemen bitişiklerindeki komşu damlalarla birleşme eğilimleri düşüktür. Çünkü birim alan başına düşen pik popülasyonunun en yüksek olduğu PP yüzeyde damlalar hemen bitişiklerindeki komşu damlalarla birleşmek için gerekli enerji bariyerlerini aşamamakta ve buda PP yüzey üzerine kondense olan damlaların temas çizgilerinde tutunmasına (*pinning effect*) yol açmaktadır. Bu nedenle PP yüzeyde ölçülen ilerleme temas açısı yüksek ve gerileme

temas açısı düşüktür ve bu iki açı arasındaki fark olan temas açısı karmaşası değeri yüksektir (Çizelge 7.2).

Şekil 7.12, polimer yüzeylerde damla kondensasyonu ile meydana gelen damlaların ortalama damla çapının zamanla değişimini göstermektedir.



Şekil.7.12. %63 bağıl nemde, polimer yüzeylerde damla kondensasyonu ile meydana gelen damlaların ortalama damla temas çapının zamanla değişimi.

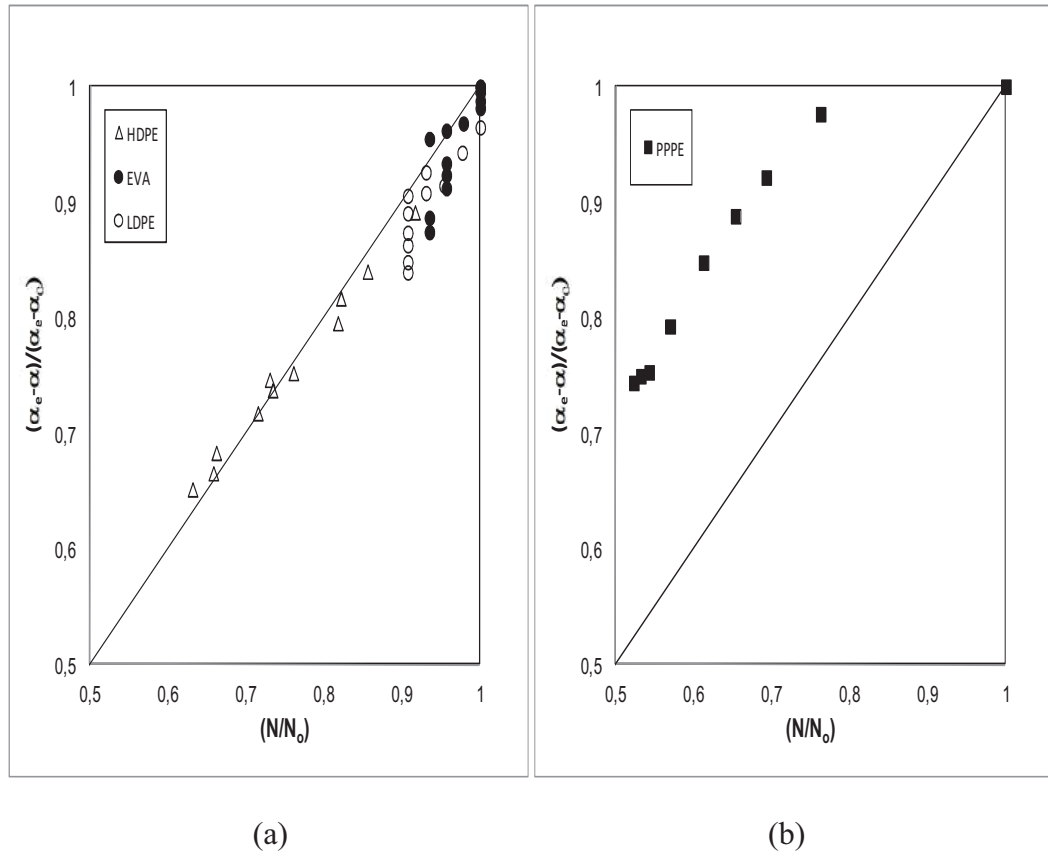
Polimer yüzeylerde sıvı-katı ara yüzeyindeki ortalama damla temas çapının ($D_{ortalama}=2r_b$), zamana karşı değişimini gösteren bu şekilde damla temas çapı üzerindeki tutunma etkisi (*pinning effect*) başta özellikle en pürüzlü yüzey olan PP yüzey olmak üzere tüm pürüzlü yüzeylerde belirgin olarak görülmektedir. PP yüzey üzerine kondense olan damlalar kayma-tutma hareketi (*slip-stick motion*) sergilemektedir çünkü temas çizgisinde tutunmaya neden olan PP yüzeyin sahip olduğu yüksek temas açısı karmaşası değeridir. Bu tip hareket, damla temas çizgisinde enerji bariyerlerinin varlığının indikatif bir göstergesidir. Kayma-tutma hareketi HDPE ve PPPE polimerlerinde ise kısmen görülmektedir. Bu hareket temas açısı karmaşası en yüksek PP ve nispeten yüksek HDPE ve PPPE yüzeylerde görülürken LDPE ve EVA yüzeylerde görülmemektedir. Bunun nedeni, LDPE ve EVA yüzeylerin düşük yüzey pürüzlülüğü ve düşük temas açısı karmaşasına sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla bu yüzeylere kondense olan damlalar,

yüzeyle temas eden temas çizgilerinde herhangi bir takılmaya uğramaksızın özgürce büyüyeabilmektedirler.

HDPE yüzeye kondense olan damlaların çapları PPPE yüzeye kondense olan damlaların çaplarından büyük olmasına rağmen, PPPE yüzeyde birim alan başına kondense olan damla sayısı daha fazla olduğundan (Çizelge 7.5) HDPE ve PPPE yüzeylere kondense olan damlaların yüzey kaplama oranı değerleri birbirine yakın seyretmektedir (Çizelge 7.4). Bu iki polimerik yüzeyin R_{rms} yüzey pürüzlülüğü değerleri birbirine çok yakın olmasına rağmen gözlenen bu durumun temel sebebininse PPPE yüzeyinde hem PP ve hem de PE gruplarının varlığından kaynaklanan kısmi kimyasal heterojenlik olduğu düşünülmektedir. Hem PP ve hem de PE gruplarında bulunan metil (CH_3 -) grupları kondense olan damla çapının küçülmesine yol açarken birim alan başına kondense olan damla sayısının artmasına neden olmaktadır. HDPE ve PPPE yüzeylerin R_{rms} yüzey pürüzlülüğü değerleri orta seviyede olduğundan denemenin ilk aşamalarında sadece birbirine çok yakın az sayıda damla arasında damla birleşmesi meydana gelmektedir (ihmal edilebilir düzeyde). Diğer taraftan amorf yapıya ve düşük R_{rms} yüzey pürüzlülüğü değerlerine sahip olmalarından dolayı düşük temas açısı karmaşası değerlerine sahip LDPE ve EVA yüzeylerde meydana gelen damla kondensasyonu PP, HDPE ve PPPE yüzeylerinde meydana gelen damla kondensasyonundan farklıdır. LDPE ve EVA yüzeylerde birim alan başına kondense olan damla sayısı düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olmalarından dolayı çok düşüktür (Çizelge 7.5). Dolayısıyla bu yüzeylerde neredeyse hiç damla birleşmesi meydana gelmemektedir.

Briscoe ve Galvin [1991], temas açısı karmaşası 17° olan düzgün PE film yüzeyi üzerinde çiğlenme noktasına yakın koşullarda damla tipi kondensasyon gerçekleştirmişlerdir ve elde ettikleri sonuçları Vincent eşitliğine uygulamışlardır (Eşitlik 4.6) [Vincent, 1951]. Vincent tarafından önerilen ve Briscoe ve Galvin tarafından geliştirilen bu eşitlik damlaların yüzeyi kaplama oranı ile birim alan başına kondense olan damla sayısı arasındaki ilişkiyi veren bir bağıntıdır. Eşitlik 4.6'da yer alan α değerini herhangi bir anda damlaların yüzeyi kaplama oranı, α_o değerini başlangıç anındaki yüzey kaplama oranı, α_e değerini denge anındaki yüzey kaplama oranı, N değerini herhangi bir anda birim alan başına kondense olan damla sayısı ve N_o değerini başlangıç anında birim alan başına kondense olan damla sayısı

almak suretiyle Vincent eşitliğini (Eşitlik 4.6) kendi sonuçlarımıza uyguladık. α_e değeri literatürde yatay yüzeylerde gerçekleştirilen damla tipi kondensasyonun incelendiği pek çok referansta %50-%55 arasında rapor edildiğinden [Fritter et al. 1991; Briscoe and Galvin, 1991; Briscoe and Galvin, 1991; Zhao and Beysens, 1995] çalışmamız için bu değeri %53 olarak aldık. α , N and N_o değerlerini HDPE, PPPE ve EVA polimerleri için Şekil 7.4-7.8'in UTHSCSA şekil analizi programının analiz sonuçlarından aldık ve Eşitlik 4.6'nın sol tarafını sağ tarafına karşı grafiğe geçirdik (Şekil 7.13).



Şekil.7.13. %63 bağıl nemde, (a) HDPE, LDPE ve EVA, (b) PPPE yüzeyler için $(\alpha_e - \alpha) / (\alpha_e - \alpha_o)$ oranının (N/N_o) oranı ile değişimi.

Bu grafikten de görüldüğü üzere bizim sonuçlarımızı Vincent eşitliğine (Eşitlik 4.6) uyguladığımızda diagonal düz bir çizgi elde ettik (PP yüzeyin pürüzlü olmasından dolayı başlangıç anı için birim alan başına kondense olan damla sayısı çok yüksek olduğundan, PP yüzeye ait sonuçları bu grafiğe dahil etmedik). Şekil 7.13'ten görüldüğü üzere en iyi sonucu HDPE yüzey vermiştir. Bu sonuç oldukça ilginçtir çünkü Vincent tarafından ortaya atılan ve Briscoe ve Galvin tarafından

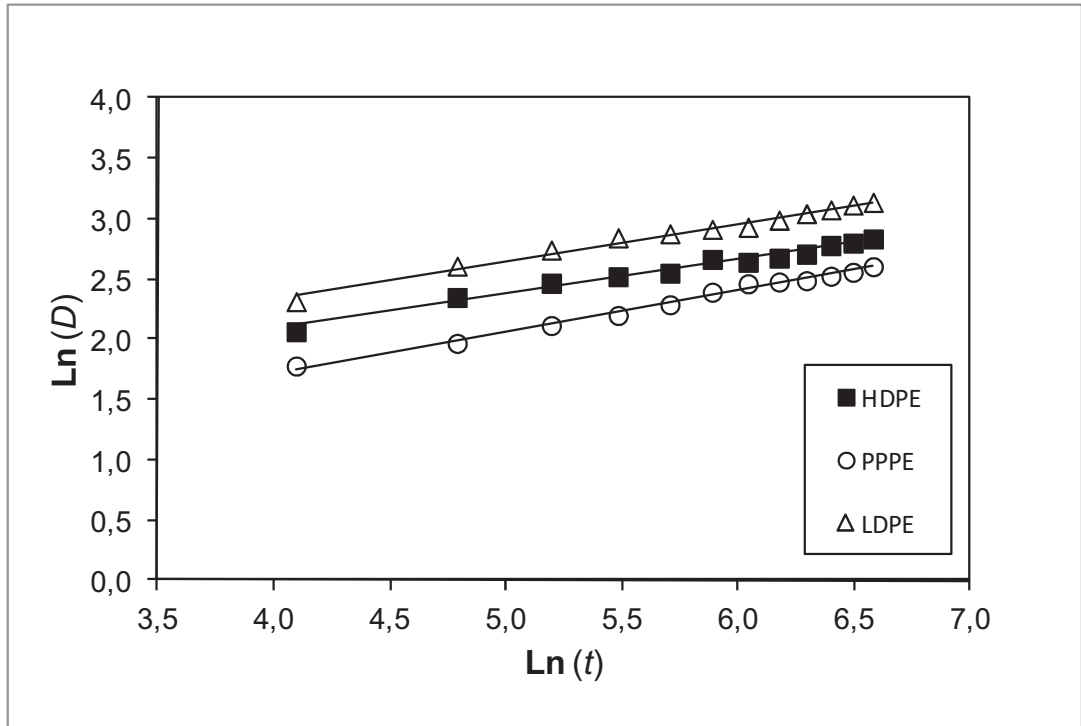
geliştirilen Vincent eşitliği (Eşitlik 4.6) temas açısı karmaşasının ihmal edilebilir düzeyde düşük olduğu durumlar için türetilmiştir. Ancak Briscoe ve Galvin'in kendi uygulamalarında kullandıkları PE yüzeyde 17° temas açısı karmaşasına sahiptir ve bu denklem bizim 35° temas açısı karmaşasına sahip HDPE yüzeyi içinde iyi sonuç vermiştir. Bu durum, üretilen semi-ampirik denklemin temas açısı karmaşasına bağlı olmadığını göstermektedir.

Diğer taraftan PPPE polimerinin sonuçları HDPE polimerinin sonuçları ile benzer eğilim göstermekte ancak N/N_o değeri teorik olarak türetilen diagonal çizgiden 0,2 değer kaymaktadır [Şekil 7.13. (b)]. PPPE polimeri için hem N_o ve hem de N değerleri HDPE polimerinde elde edilenden yaklaşık iki kat daha yüksektir. PPPE polimeri için N/N_o değerindeki azalma hızı HDPE polimerinde olduğundan daha hızlıdır. Bunun sebebi PPPE yüzeyi üzerindeki az sayıda da olsa meydana gelen damla birleşmesinin HDPE yüzeyinde meydana gelenden daha fazla sayıda olmasıdır. Zaten PPPE polimeri üzerinde birim alan başına kondense olan damla sayısı daha yüksek olduğundan (Çizelge 7.5) ve temas açısı karmaşası değeri daha düşük olduğundan damla birleşmesine HDPE den daha müsaittir. Bu sonuçlar Vincent eşitliğinin (Eşitlik 4.6) N_o değeri $1000-2000 \text{ mm}^{-2}$ olduğunda damla kondensasyonunda başarılı bir şekilde uygulanabildiğini göstermektedir.

EVA ve LDPE yüzeyleri için ise durum daha farklıdır. Bu yüzeyler başlangıç anında çok düşük N_o değerlerine sahip olduklarından ($230-250 \text{ mm}^{-2}$) (Çizelge 7.5) N/N_o değerlerinde çok yavaş bir düşüş meydana gelmektedir ve bu yüzeylerin verileri $N/N_o \cong 1$ civarında toplanmaktadır. EVA ve LDPE yüzeyleri için N/N_o değerlerindeki yavaş düşüşün nedeni bu yüzeylerde birim alan başına kondense olan damla sayısının az olması (Çizelge 7.5) ve dolayısıyla damla birleşmesinin meydana gelmemesidir.

Sonuç olarak Vincent eşitliği (Eşitlik 4.6) orta derecede pürüzlülük içeren yüzeylerde atmosferik koşullarda çiğlenme noktasının hemen altında gerçekleştirilen damla kondensasyonu için başlangıç anında birim alan başına kondense olan damla sayısı $1000-2000 \text{ mm}^{-2}$ civarında olduğunda uygulanabilir. Diğer taraftan diğer yüzeylere nazaran daha fazla damla birleşmesinin meydana geldiği PPPE yüzeyi dışında N değerlerinin zamanla genel olarak değişmediği de söylenebilir (Çizelge 7.5).

Briscoe ve Galvin [1991], çalışmalarında damlaların iki farklı rejime uygun şekilde büyüdüklerini rapor etmişlerdir. İlk rejimde, kondensasyonun başlangıcında damlaların adeta birer izole damla gibi büyüdüklerini, bu esnada damlalar arasında meydana gelen damla birleşmesi olayının olmadığını veya ihmal edilecek düzeyde olduğunu rapor etmişlerdir. Bu izole damlaların büyüme hızı yayılan gizli ısı ile sınırlıdır. İkinci rejimde ise damlalar arasında çok sayıda damla birleşmesi meydana gelmekte, açığa çıkan gizli ısı damlalar arasında kolaylıkla yayılabilmektedir. Buna göre ilk rejim için damla çapının zamanın $1/3$. kuvvetiyle doğru orantılı olarak büyüdüğünü $[D \propto \text{time}^{1/3}]$, ikinci rejimde ise damla çapının zamanla doğru orantılı olarak (zamanın 1. kuvvetiyle) $[D \propto \text{time}]$ büyüdüğünü rapor etmişlerdir. Buna istinaden bizde çalışmamız için HDPE, PPPE ve LDPE yüzeylerine kondense olan damlaların ortalama damla çapının log-log grafiğini zamana karşı grafiğe geçirdik (Şekil 7.14).



Şekil 7.14. %63 bağıl nemde, HDPE, PPPE ve LDPE yüzeylerde kondense olan damlaların ortalama damla çapının logaritmasının zamanın logaritması ile değişimi.

Elde edilen doğruların eğimlerini HDPE için 0,29, PPPE için 0,34, LDPE için 0,31 (EVA için 0,38) olarak bulduk. Bu sonuçlar Briscoe ve Galvin [1991] çalışmasında ilk rejime uygun büyüyen damlalar için rapor ettikleri sonuçlarla

uyumludur. Dolayısıyla bizim çalışmamızda yüzeylere kondense olan damlalar damla birleşmesinin ihmal edilebilecek düzeyde az olduğu büyüme rejimi olan ilk rejime uygun olarak büyümektedir.

7.1.4. Damlacıkların Toplam Yüzey Alanı ve Toplam Hacim Artışı

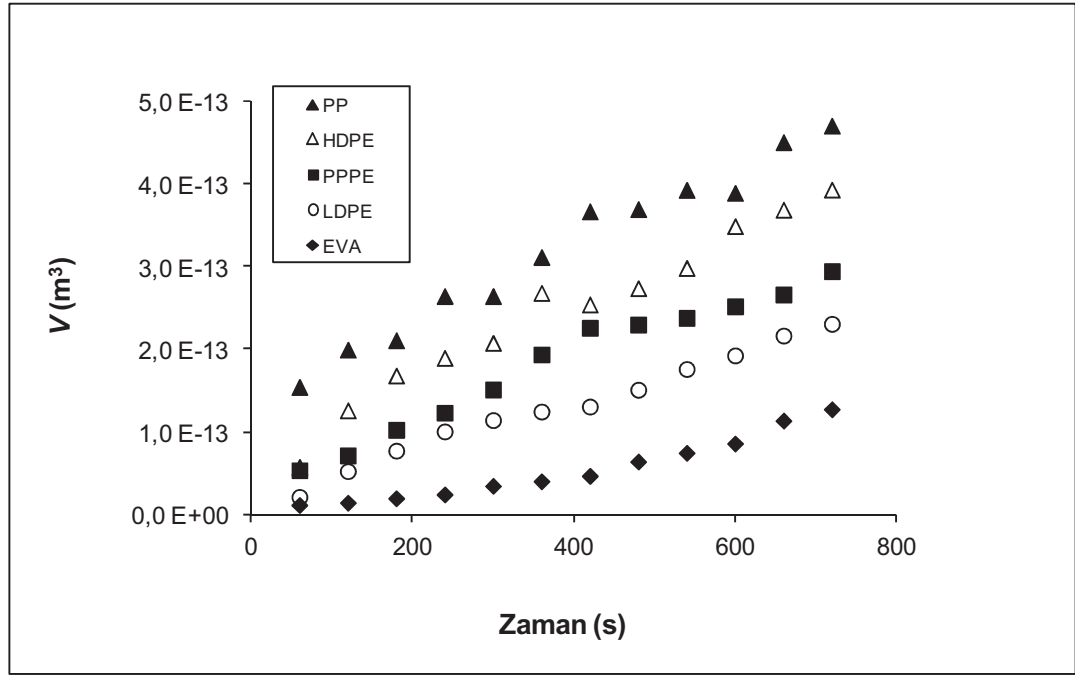
Damlaların yüzey kaplama oranı, sıvı/katı ara yüzeyinde meydana getirdikleri üstten görünen (plan) alan olduğundan damlaların toplam alan ve toplam hacimlerinde meydana getirdikleri artışı da incelemek istedik. Bu amaçla polimer yüzey üzerine kondense olan her bir damla için tek tek sıvı/katı (A_{LS}), sıvı/hava (A_{LV}) ve hacim (V) değerlerini damla buharlaşması çalışmaları için rapor edilen [Picknett and Bexon, 1977; Rowan et al. 1995] iki parametrelili küresel damla modeli eşitliklerini kullanarak (Eşitlik 6.1, 6.2 ve 6.3) [Meric and Erbil, 1998] hesapladık ve elde edilen sonuçların her bir dakika sonu için toplamını aldık. Böylece her bir polimer yüzeyde zamana karşı toplam alan ve hacim değişimlerini hesaplamış olduk.

Esasen küresel damla geometrisi damla yüksekliği (h), damla temas yarıçapı (r_b), küresel damla yarıçapı (plan radius) (R) ve temas açısı (θ) olmak üzere toplam 4 parametre kullanılarak karakterize edilir. Ancak biz damlalara optik mikroskopla tepeden baktığımızdan ve damla yüksekliğini göremediğimizden hesaplarda iki parametrelili küresel damla modeline ait eşitlikleri (Eşitlik 6.1, 6.2 ve 6.3) kullandık. R değerlerini optik mikroskopta çekilen damlaların 2D görüntülerin (Şekil 7.4-7.8) analizinden, r_b değerlerini R ve r_b arasındaki ilişkiyi, ($r_b = R \sin \theta$), kullanarak, θ değerlerini deneme öncesinde gerçekleştirilen temas açısı ölçüm sonuçlarından (Çizelge 7.2) elde ettik. İki parametrelili küresel damla modelini uygulamak için gerekli tüm analizleri UTHSCSA görüntü işleme ve analiz programını kullanarak gerçekleştirdik. Bu programın bize verdiği boyutlar piksel biriminde olduğundan optik mikroskobun skalasıyla gerekli boyut kalibrasyonunu yaptıktan sonra birimleri metre (m) olarak rapor ettik.

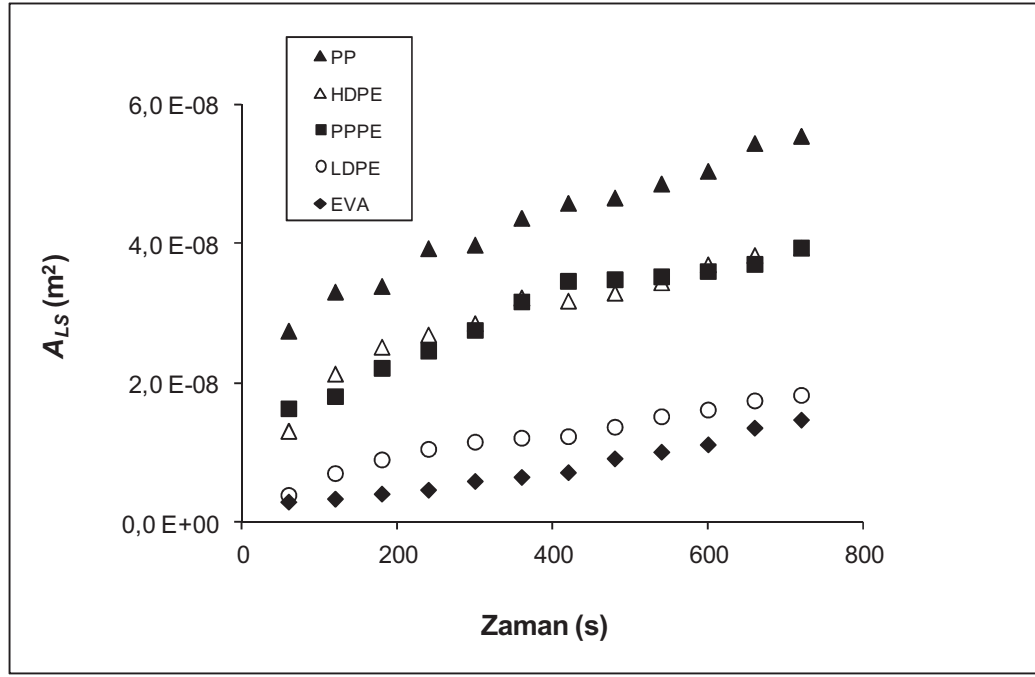
Yüzeylerin pürüzlülüğüne dair elimizde herhangi bir geometrik veri bulunmadığından damlaların alan ve hacim hesaplarında pürüzlülük etkisini hesaba alamadık. Damlaların toplam hacminin zamana karşı değişimini veren Şekil 7.15

incelendiğinde damlaların toplam hacimlerinin zamana karşı artışının damlaların yüzey kaplama oranının zamana karşı artışı ile aynı sırada ($PP > HDPE > PPPE > LDPE > EVA$) olduğu görülmektedir. Damlaların zamana karşı A_{LS} ve A_{LV} toplam alan artışlarının verildiği Şekil 7.16 ve Şekil 7.17’den lineer bir değişim olmadığı, elde edilen her iki artışında zamana karşı hacim artışı ile benzer eğilim gösterdiği görülmektedir.

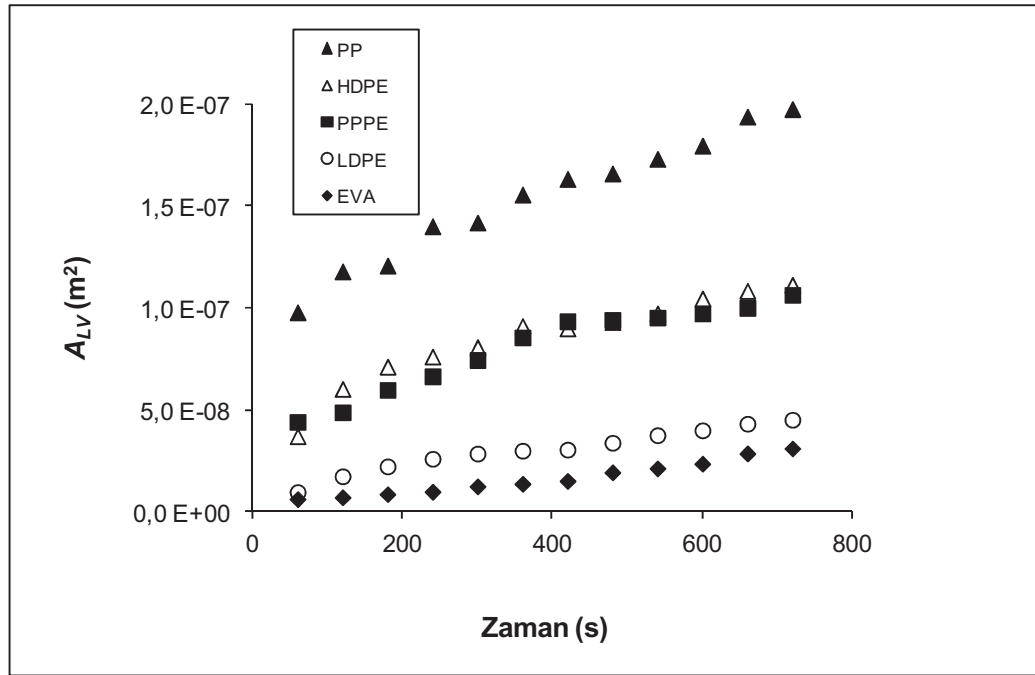
Bu sonuçlardan damlaların toplam hacim ve toplam alan artışlarının pürüzlülüğü yüksek olan yüzeylerde birim alan başına kondense olan damla sayısı daha fazla olduğundan literatürde de rapor edildiği gibi [McCormick, 1965; Patankar, 2010] yüzey pürüzlülüğü artışı ile arttığı sonucuna varılmaktadır.



Şekil.7.15. %63 bağıl nemde, polimer yüzeylere kondense olan damlaların hacminin zamana bağlı artışı.



Şekil.7.16. %63 bağıl nemde, polimer yüzeylere kondense olan damlaların sıvı-katı ara yüzeyindeki toplam alanlarının zamanla değişimi.



Şekil.7.17. %63 bağıl nemde, polimer yüzeylere kondense olan damlaların sıvı-hava ara yüzeyindeki toplam alanlarının zamanla değişimi.

7.2. Sabit %35-47 Bağıl Nemde Çiğlenme Sıcaklığının Altındaki Yüzey Üzerindeki Damlacık Kondensasyonunun İncelenmesi ve Yüzey Özellikleri ile İlişkilendirilmesi

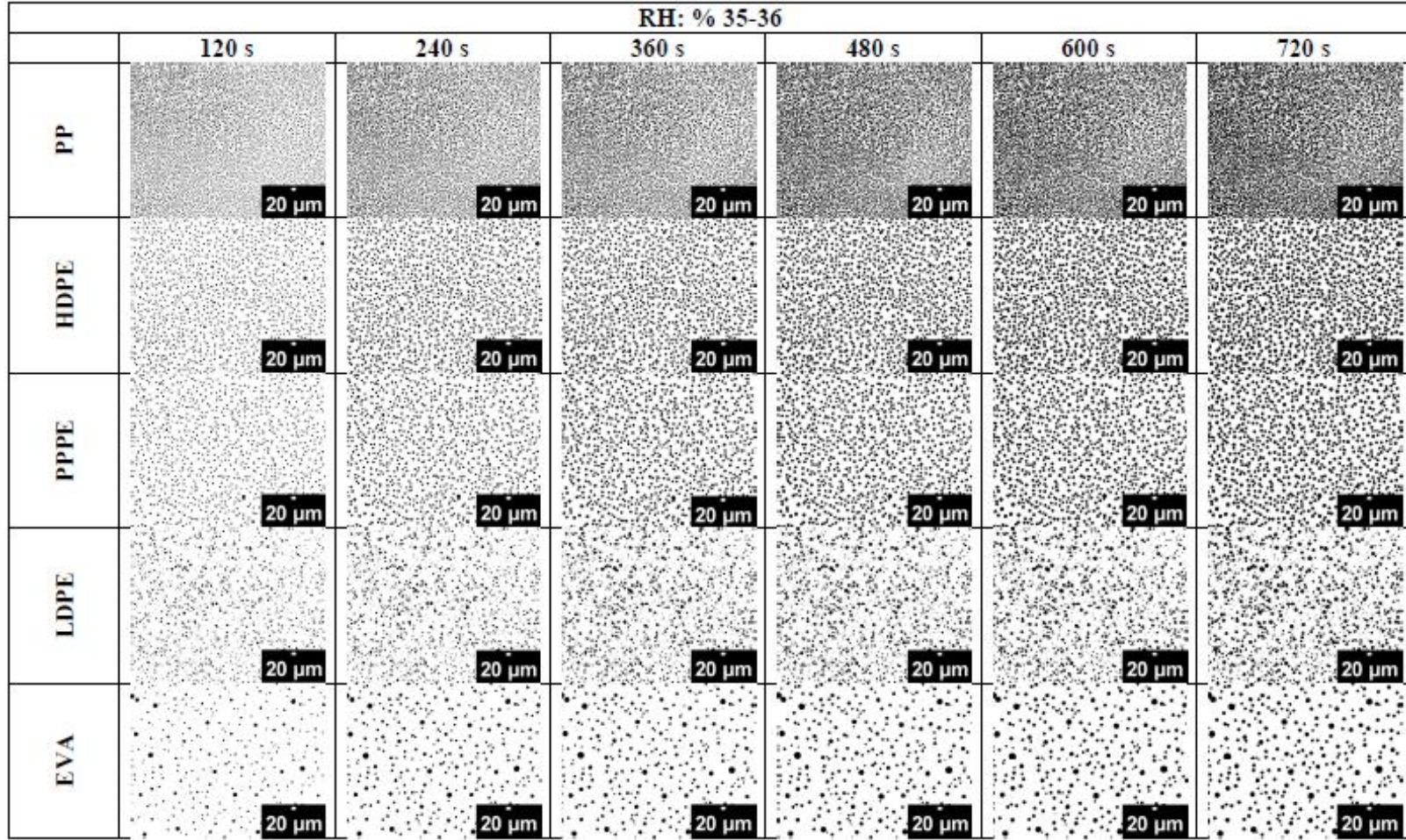
Çalışmanın bu kısmında atmosferik ortamda %35-47 sabit bağıl nemde, çiğlenme sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda yoğunlaşan damlacıkların yüzey özelliklerinin damlacık kondensasyonu üzerine olan etkisi incelenmiştir.

Optik mikroskop görüntüleri ve yüzey karakterizasyon sonuçları bölüm 7.1.1’de verilen PP, HDPE, PPPE, LDPE ve EVA polimerleri üzerinde atmosferik ortamda %35-36, %38, %43 ve %46-47 olmak üzere dört farklı sabit bağıl nemde ve çiğlenme sıcaklığının altında gerçekleştirilen damla kondensasyonu denemelerine ait kondensasyon koşulları Çizelge 7.6’da verilmektedir.

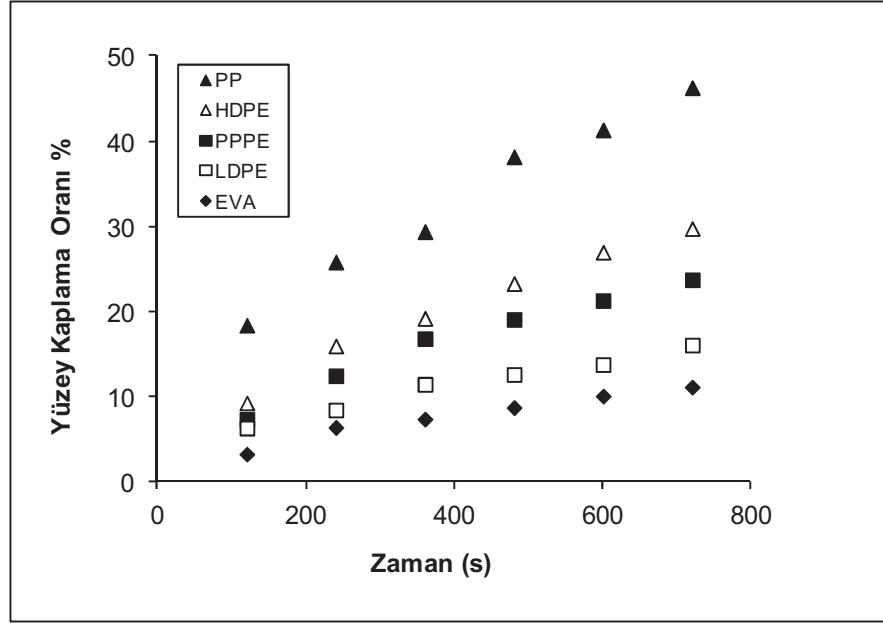
Kondensasyon sırasında 100x büyültmede elde edilen optik mikroskop görüntülerinden yüzeyde meydana gelen damlaların yüzeyi kaplama oranını tespit etmek için birer görüntü işleme ve analiz programı olan UTHSCSA Image Tool ve Image J programlarından yararlanılmıştır. Bu programlar kullanılarak renkli bağımsız şekillerin işlenmesi ve analiz edilmesi mümkündür. Sadece siyah ve beyaz (binary) hale getirilen resimlerde bu programlar kullanılarak siyah alanların beyaz alanlara oranı (damlaların yüzeyi kaplama oranı) hesaplatılmış ve her bir yüzey için 2 ila 12 dk arasında 2’şer dk ara ile çekilen fotoğraflardan % değer olarak tespit edilmiştir ve yüzey özellikleri ile ilişkilendirilmiştir. %35-47 nem aralığı için elde edilen tüm sonuçlar Şekil 7-18-7.29’da verilmektedir.

Çizelge 7.6. %35-%47 bağıl nemlerde gerçekleştirilen kondensasyon denemelerine ait koşullar.

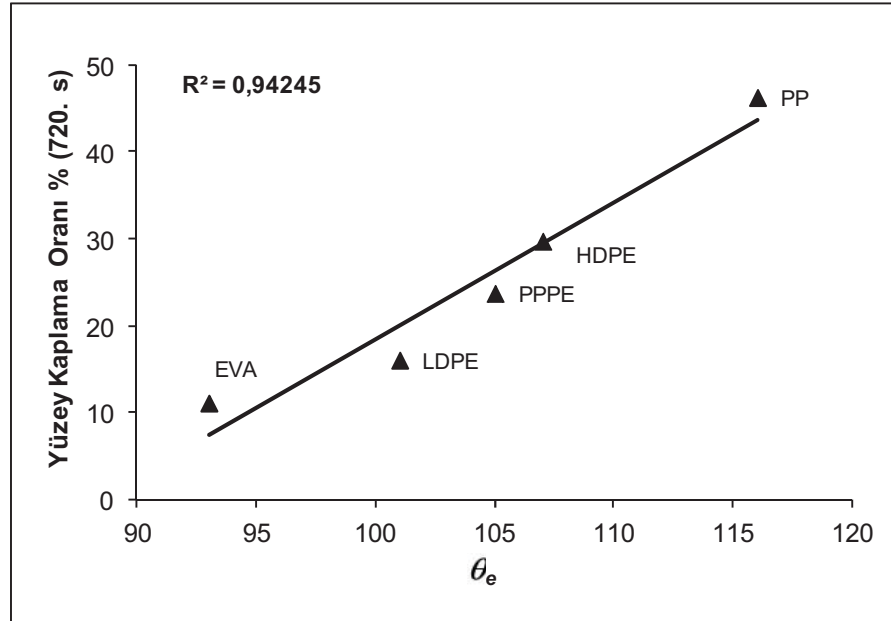
RH (%)	$T_{dış}$ (°C)	$T_{yüzey}$ (°C)	$\Delta T: T_{dış} - T_{yüzey}$ (°C)	$T_{çiğ\ noktası}$ (°C)	$\Delta T_{çiğ}: T_{yüzey} - T_{çiğ}$ (°C)
35-36	21	4	17	5	-1
38	22	6	16	7	-1
43	23	9	14	10	-1
46-47	23	4	19	11	-7



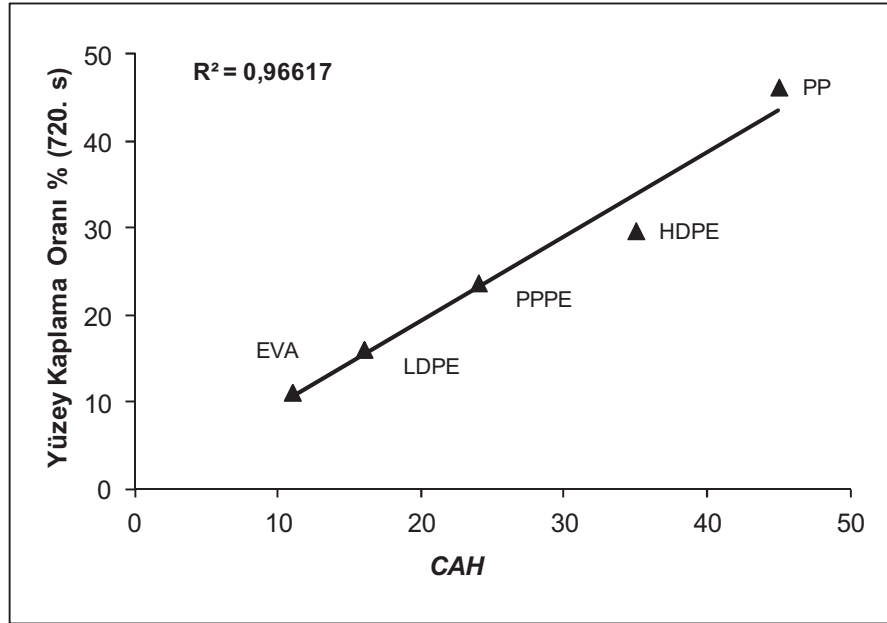
Şekil.7.18. %35-36 bağıl nemde, polimer yüzeylerde kondense olan damlaların 100x büyültmede çekilmiş optik mikroskop görüntüleri.



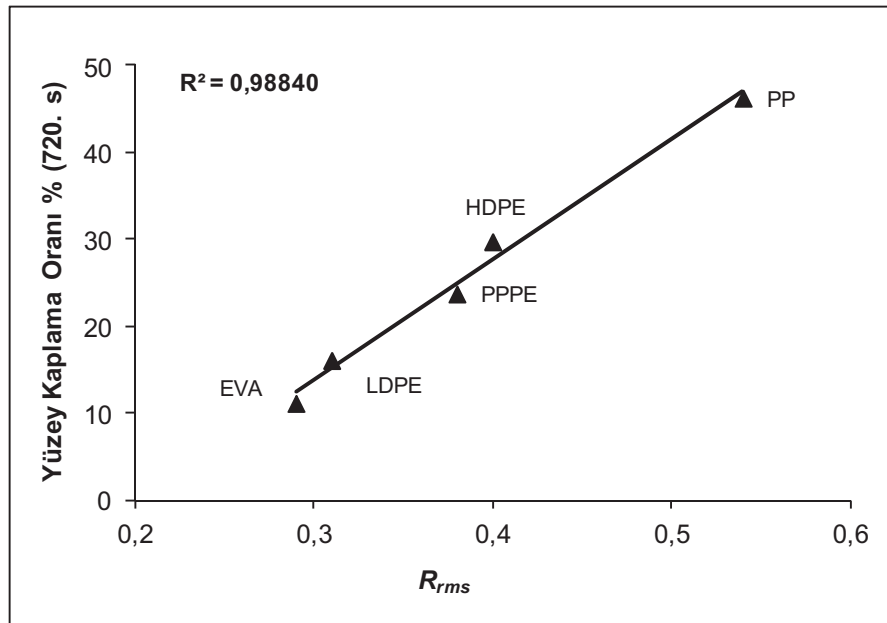
Şekil 7.19. %35-36 bağıl nemde, polimer yüzeylerde meydana gelen yüzey kaplama oranının zamanla değişimi.



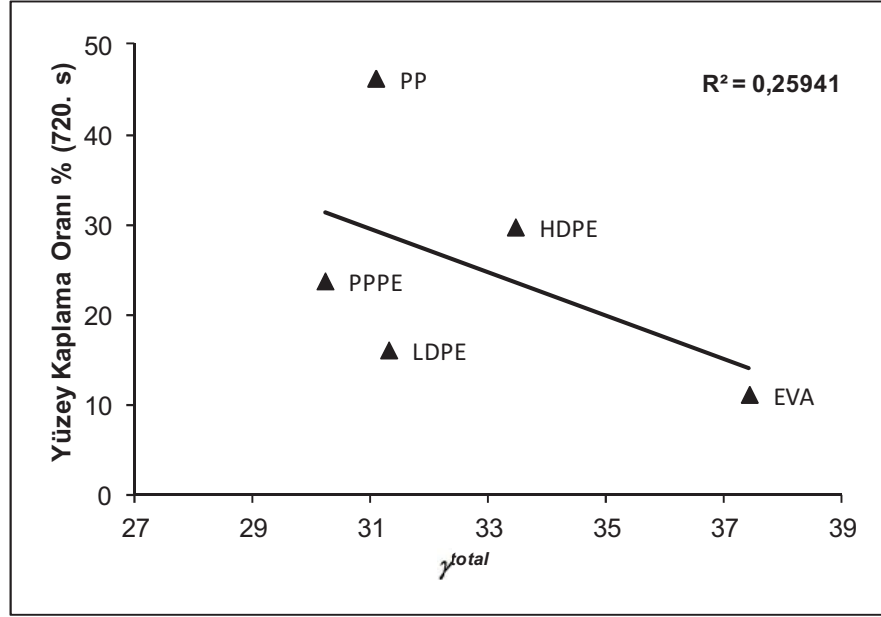
Şekil 7.20. (a)



Şekil 7.20. (b)

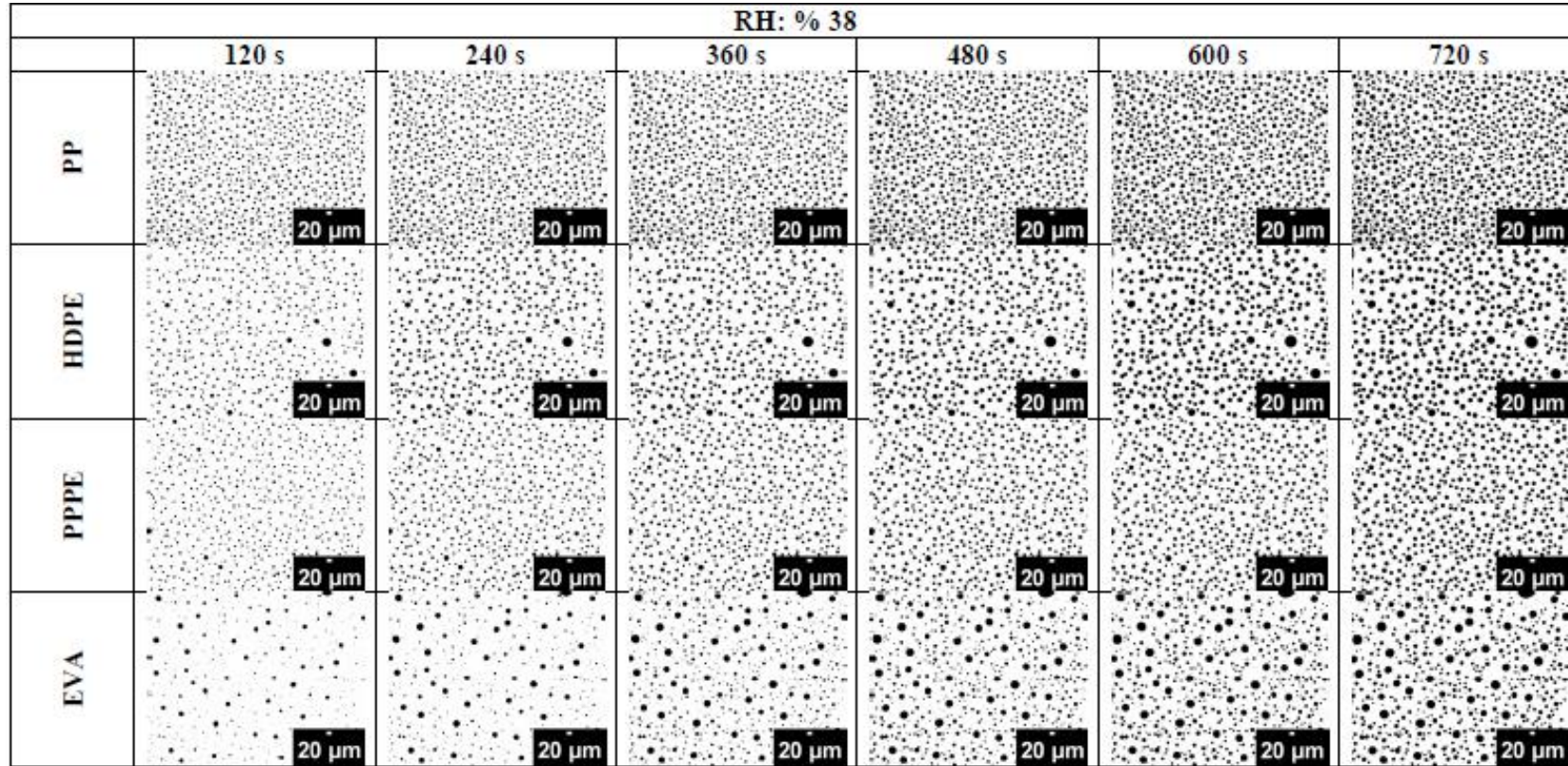


Şekil 7.20. (c)

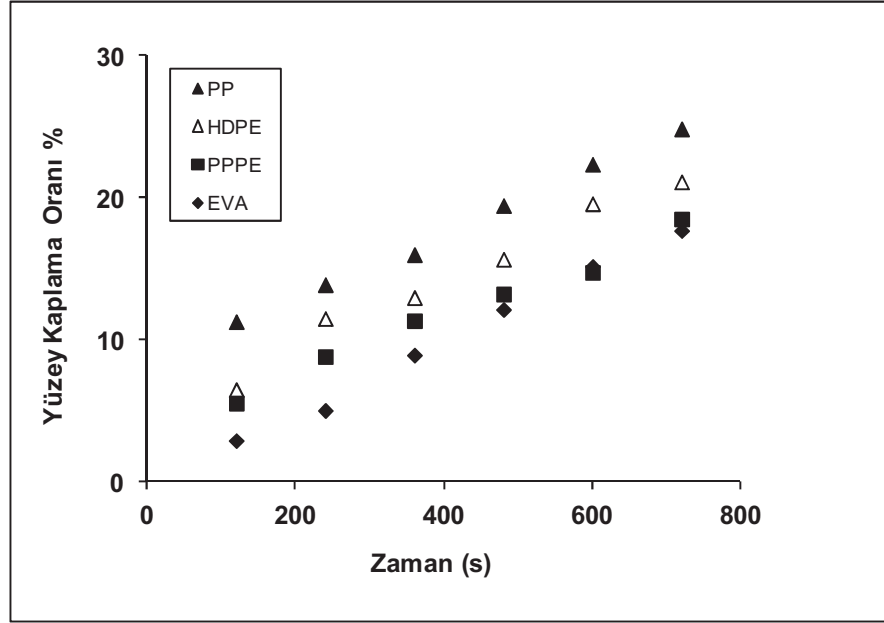


Şekil 7.20. (d)

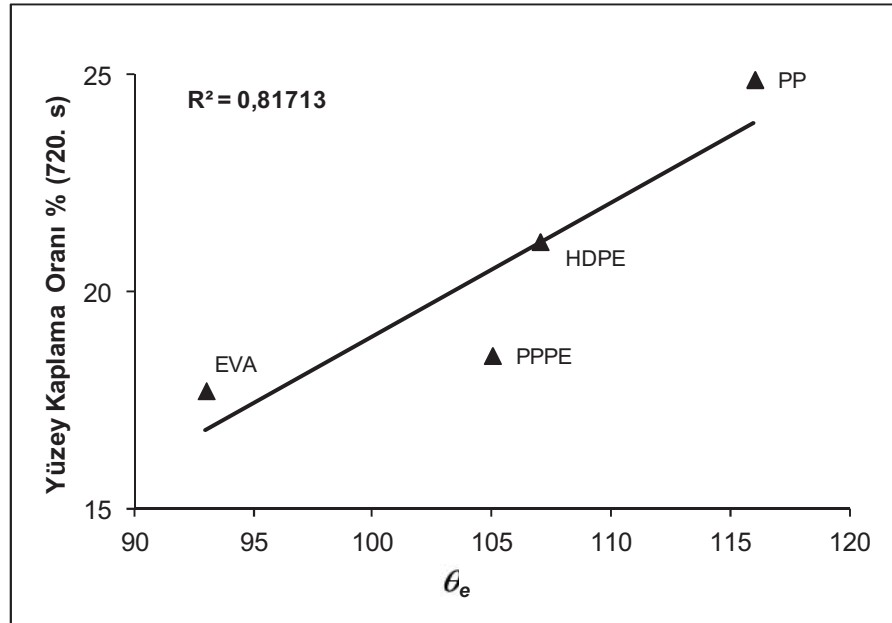
Şekil 7.20. %35-36 bağıl nemde, polimer yüzeylerde 720. s’de meydana gelen yüzey kaplama oranının (a) su temas açısı (θ_e), (b) temas açısı karmaşası (CAH), (c) yüzey pürüzlülüğü (R_{rms}), (d) serbest yüzey enerjisi (γ^{total}) ile ilişkisi.



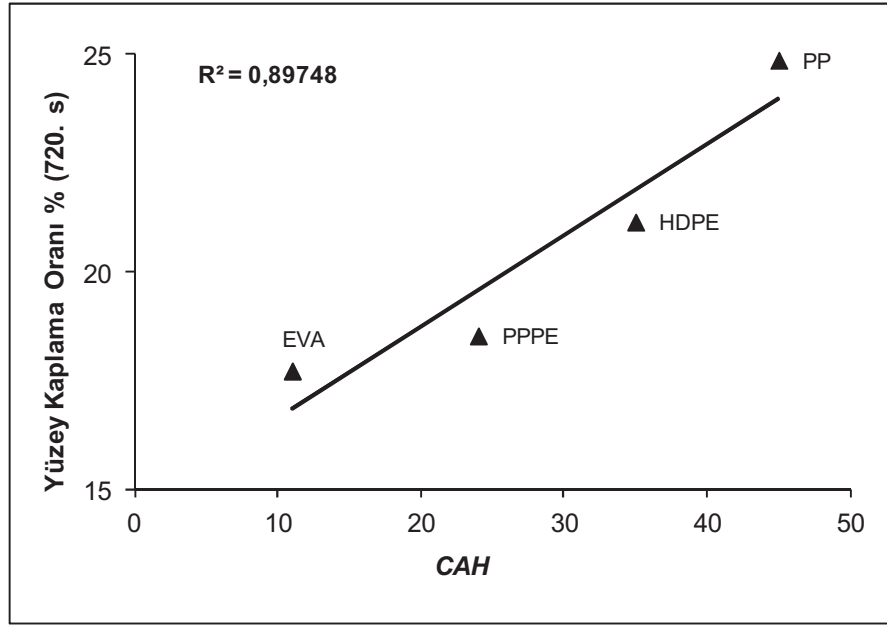
Şekil.7.21. %38 bağıl nemde, polimer yüzeylerde kondense olan damlaların 100x büyültmede çekilmiş optik mikroskop görüntüleri.



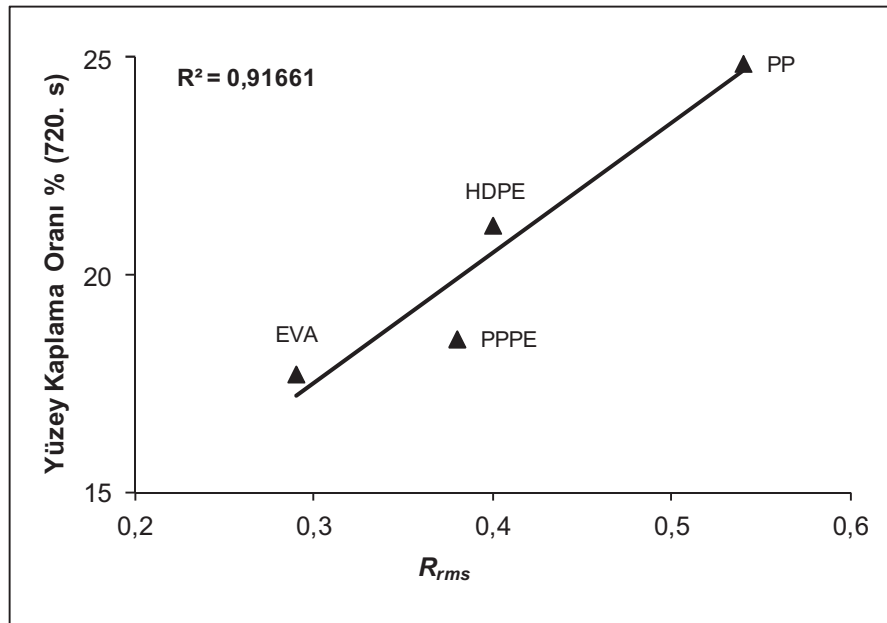
Şekil 7.22. %38 bağıl nemde, polimer yüzeylerde meydana gelen yüzey kaplama oranının zamanla değişimi.



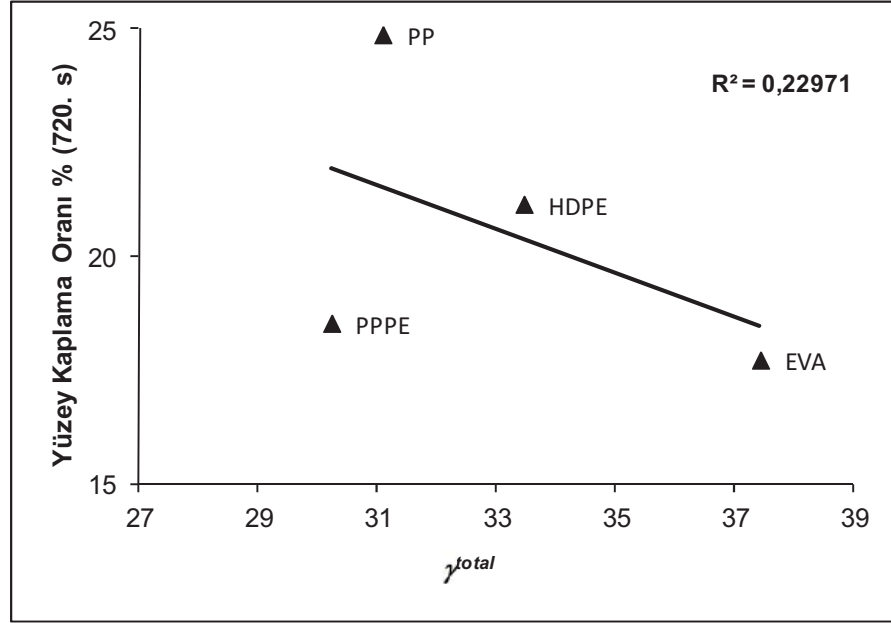
Şekil 7.23. (a)



Şekil 7.23. (b)

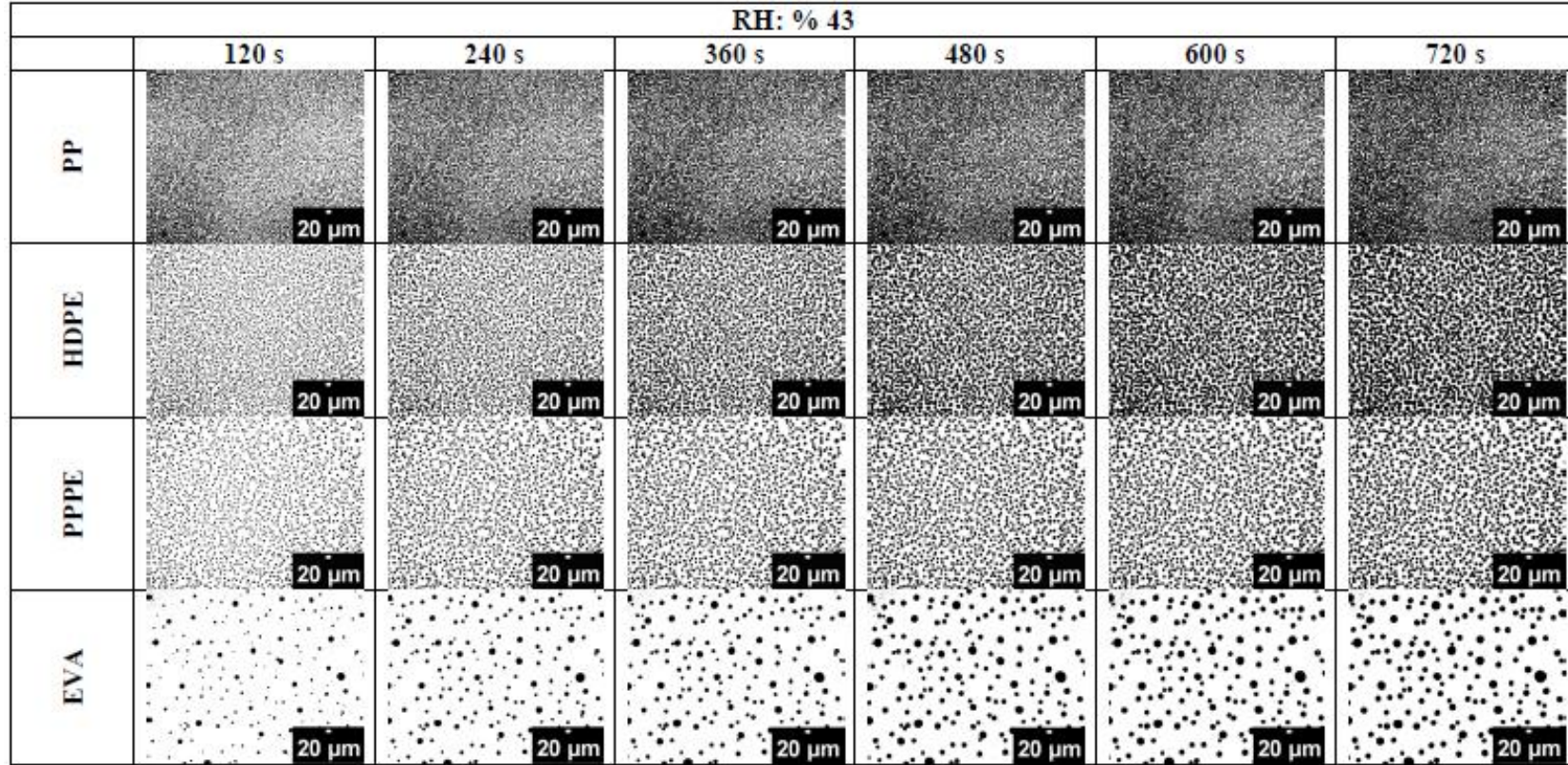


Şekil 7.23. (c)

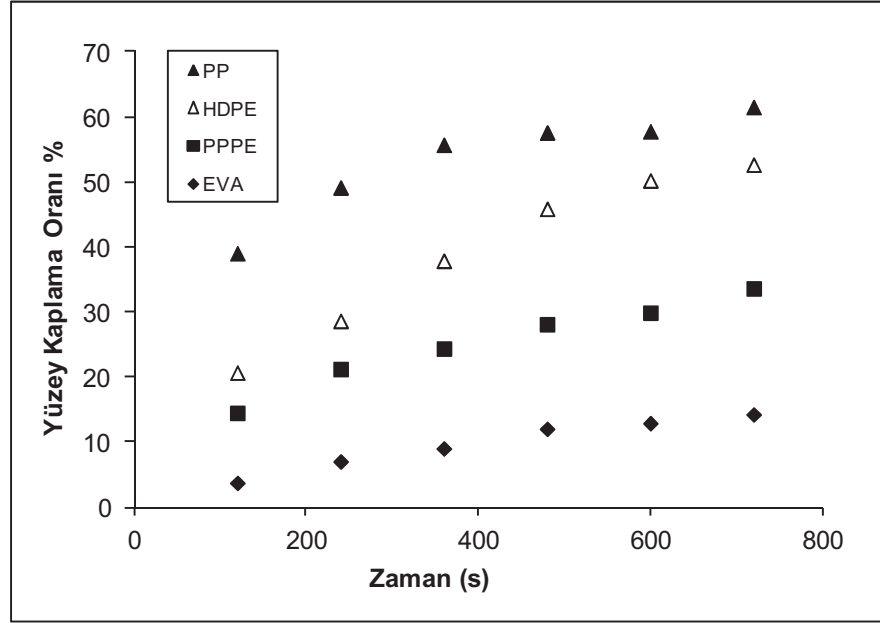


Şekil 7.23. (d)

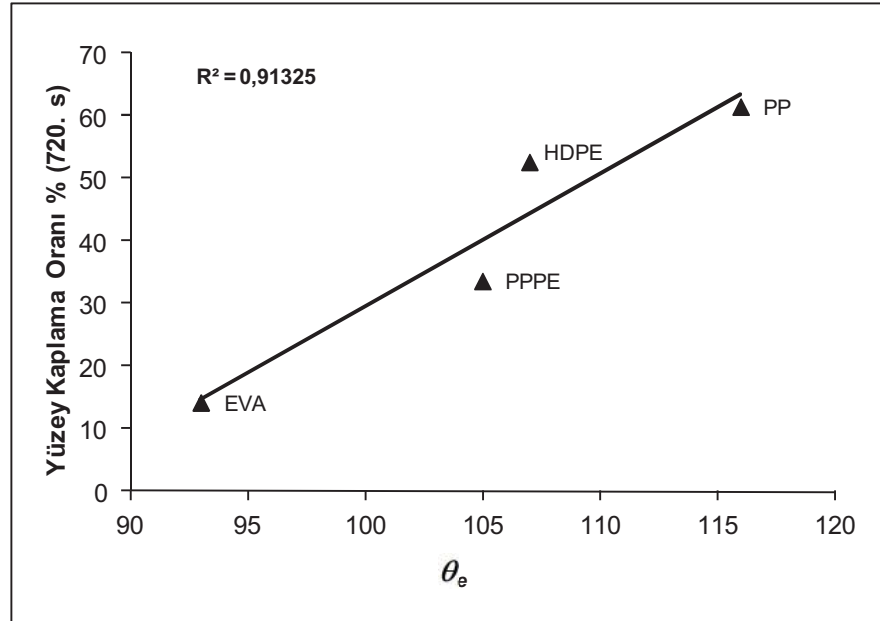
Şekil 7.23. %38 bağıl nemde, polimer yüzeylerde 720. s’de meydana gelen yüzey kaplama oranının (a) su temas açısı (θ_e), (b) temas açısı karmaşası (CAH), (c) yüzey pürüzlülüğü (R_{rms}), (d) serbest yüzey enerjisi (γ^{total}) ile ilişkisi.



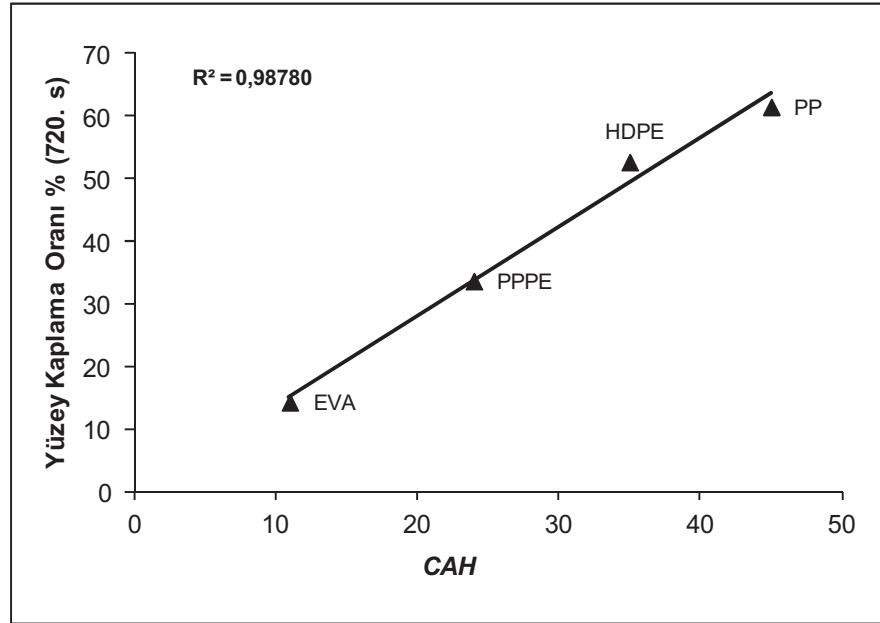
Şekil 7.24. %43 bağıl nemde, polimer yüzeylerde kondense olan damlaların 100x büyültmede çekilmiş optik mikroskop görüntüleri.



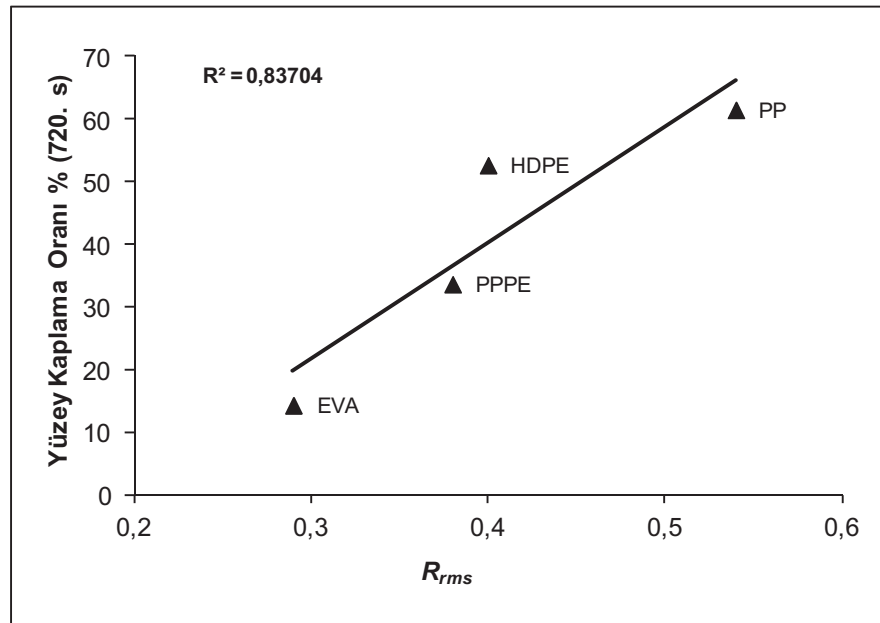
Şekil 7.25. %43 bağıl nemde, polimer yüzeylerde meydana gelen yüzey kaplama oranının zamanla değişimi.



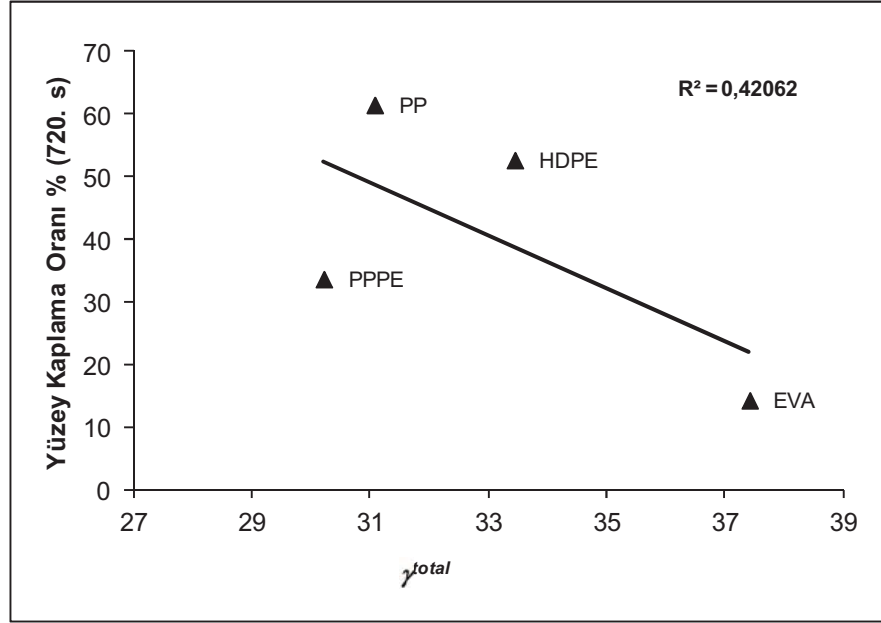
Şekil 7.26. (a)



Şekil 7.26. (b)

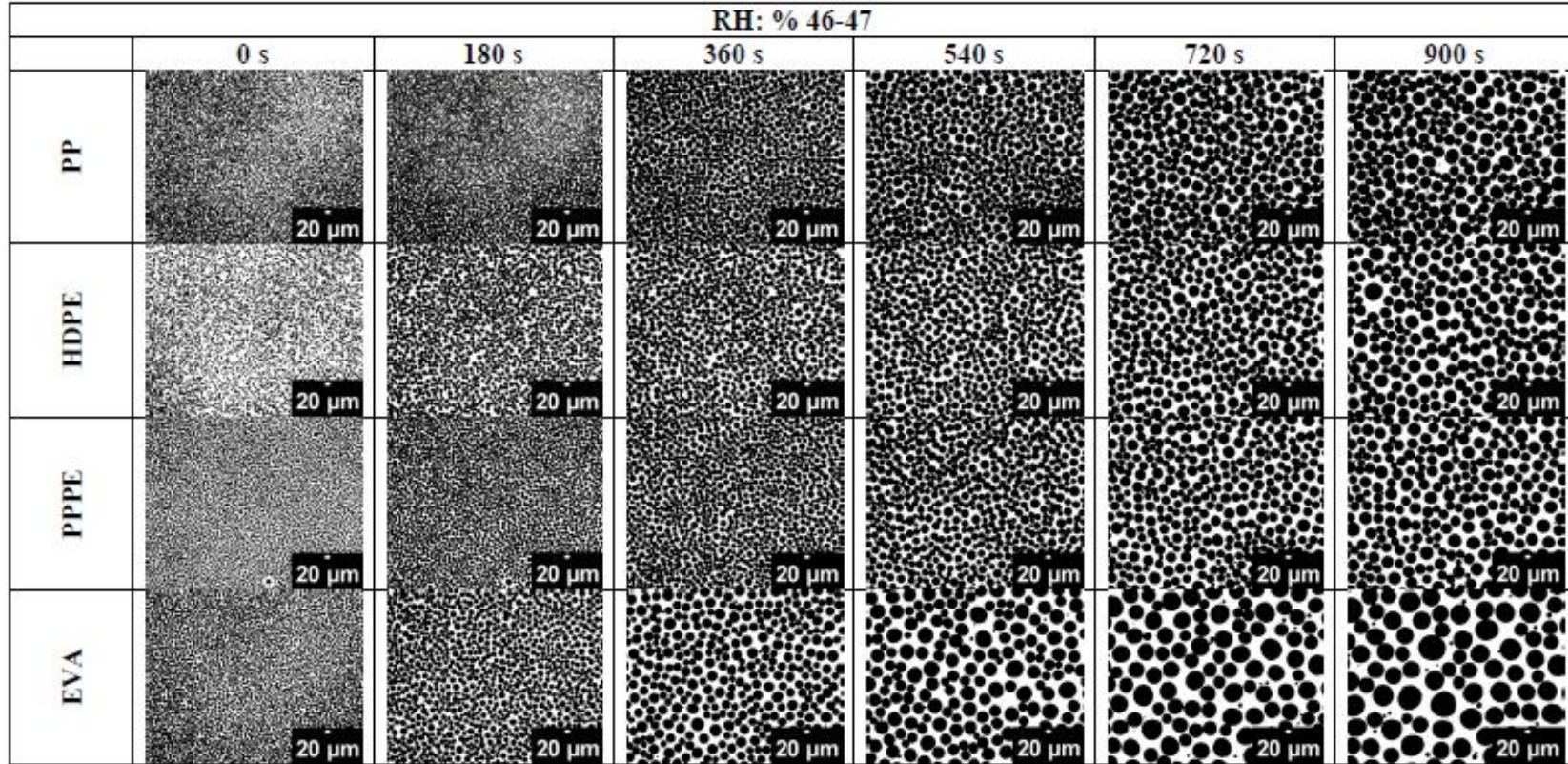


Şekil 7.26. (c)

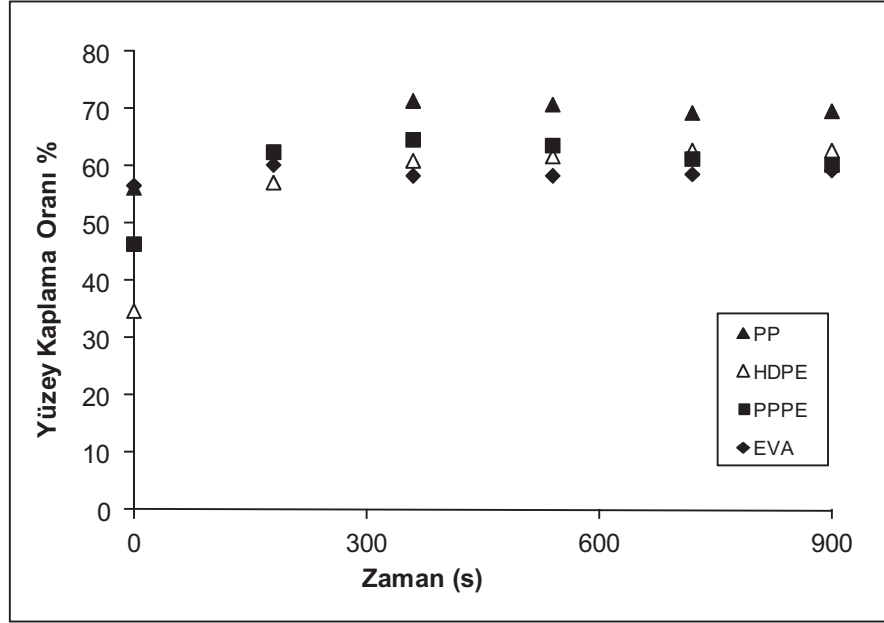


Şekil 7.26. (d)

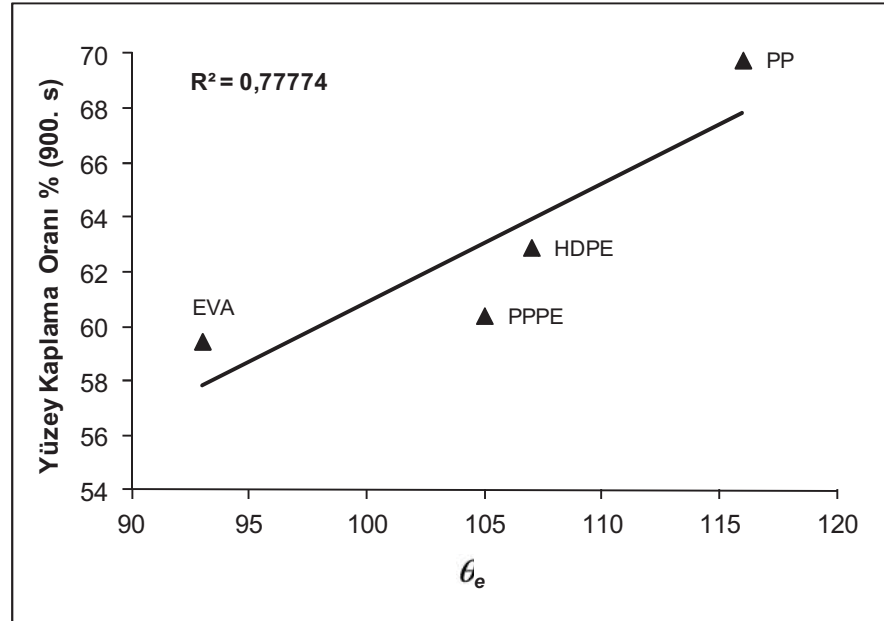
Şekil 7.26. %43 bağıl nemde, polimer yüzeylerde 720. s’de meydana gelen yüzey kaplama oranının (a) su temas açısı (θ_e), (b) temas açısı karmaşası (CAH), (c) yüzey pürüzlülüğü (R_{rms}), (d) serbest yüzey enerjisi (γ^{total}) ile ilişkisi.



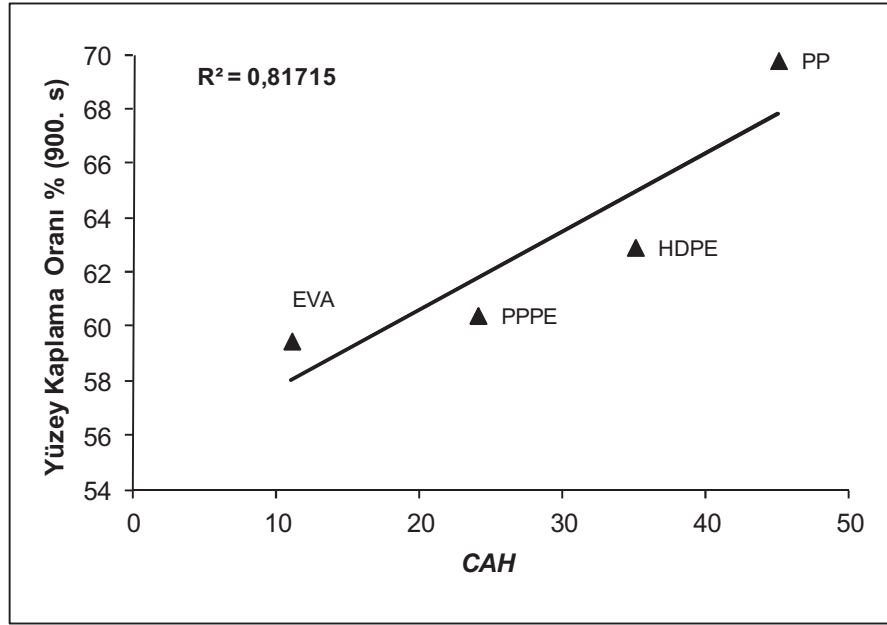
Şekil 7.27. %46-47 bağıl nemde, polimer yüzeylerde kondense olan damlaların 100x büyültmede çekilmiş optik mikroskop görüntüleri.



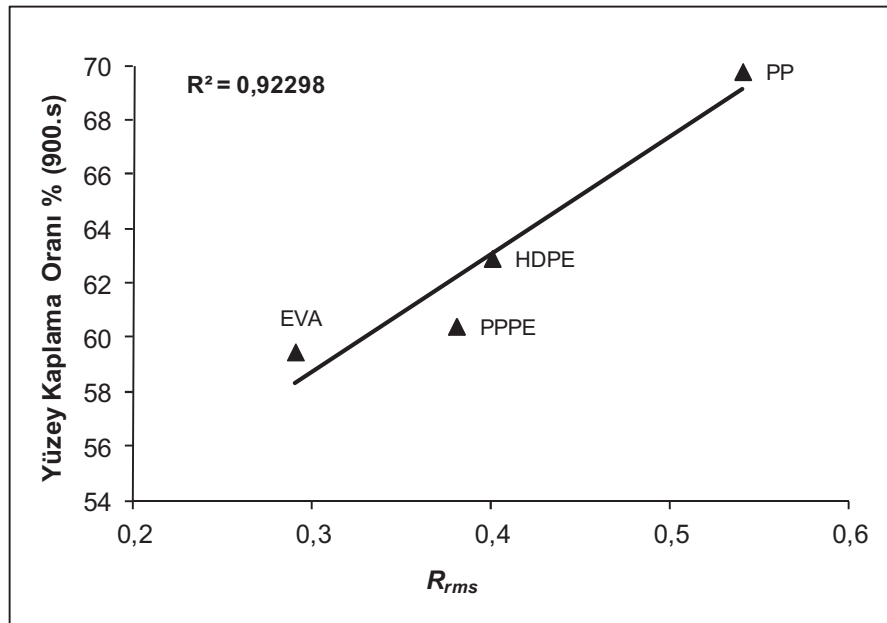
Şekil 7.28. %46-47 bağıl nemde, polimer yüzeylerde meydana gelen yüzey kaplama oranının zamanla değişimi.



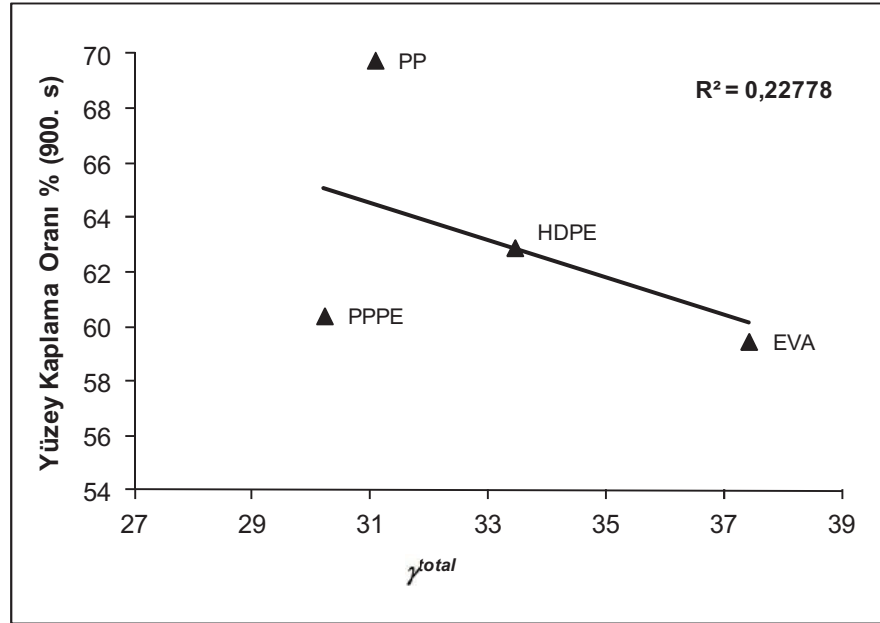
Şekil 7.29. (a)



Şekil 7.29. (b)



Şekil 7.29. (c)



Şekil 7.29. (d)

Şekil 7.29. %46-47 bağıl nemde, polimer yüzeylerde 900. s’de meydana gelen yüzey kaplama oranının (a) su temas açısı (θ_e), (b) temas açısı karmaşası (CAH), (c) yüzey pürüzlülüğü (R_{rms}), (d) serbest yüzey enerjisi (γ^{total}) ile ilişkisi.

Şekil 7.18, 7.21, 7.24 ve 7.27 polimer yüzeyler üzerine sırasıyla %35-36, %38, %43 ve %46-47 bağıl nemlerde kondense olan damlaların 100x büyültmede çekilmiş optik mikroskop görüntülerini göstermektedir. Sonuçlardan da görüldüğü üzere %35-36, %38 ve %43 bağıl nemlerde kondensasyon süresince damlaların yüzeyi kaplama oranı zamana bağlı olarak beklenildiği gibi artmaktadır (Şekil 7.19, 7.22 ve 7.25). Bu artış en çok hidrofobik PP kaplı yüzey üzerinde, en az EVA-12 kaplı yüzeyde görülmektedir. Normal şartlar altında bu yüzeyler arasında histeresis farkı olmasaydı, yani hepsi sabit bir histeresis değerine sahip olsalardı temas açısındaki azalma ile yüzey kaplama oranının artması gerekirdi. Hâlbuki burada birbirinden farklı temas açısı karmaşasına sahip yüzeyler kullanılmış ve 720 saniye sonrasında damlaların yüzey kaplama oranı, hem temas açısı ve hem de temas açısı karmaşası artışına bağlı olarak artmıştır. Burada temas açısı karmaşasındaki artışla birlikte yüzeye kondense olan damlaların pinning (tutunma) etkisinden dolayı tam birleşmeleri engellenmekte veya gecikmekte olduğundan yüzeyin damlalarla kaplanma oranı artmaktadır (Şekil 7.19, Şekil 7.22 ve Şekil 7.25).

Çiğlenme noktasının 1°C altında %35-36, %38 ve %43 bağıl nemlerde gerçekleştirilen denemelerde yüzey kaplama oranının zamana karşı değişimini gösteren grafiklerde kullanılan polimer yüzeyler arasındaki fark ayırt edilebilmektedir (Şekil 7.19, 7.22 ve 7.25). Çiğlenme noktasının 7°C altında %46-47 nemde gerçekleştirilen denemede ise kullanılan polimer yüzeyler arasında belirgin bir fark gözlenmemektedir (Şekil 7.28). Bu denemede yüzey kaplama oranının 6. dk'ya kadar attığı, 6. dk'dan sonra sabitlendiği görülmektedir (Şekil 7.28). Bu sabitlenen değer PP haricindeki diğer polimerler için %55 civarında sabitlenmekte olup bu değer literatürde rapor edilen yüzey kaplama oranının universal denge değerine eşittir [Fritter et al., 1991; Briscoe and Galvin, 1991; Briscoe and Galvin, 1991; Zhao and Beysens, 1995]. Temas açısı karmaşası en yüksek olan PP polimeri üzerinde yüzey kaplama oranı ise %65 değerinde sabitlenmektedir (Şekil 7.28). Çiğlenme noktasının 1 derece altında %35-36, %38 ve %43 bağıl nemlerde gerçekleştirilen denemelerde ise bu sabitlenme görülmemekte olup, yüzey kaplama oranı sürekli olarak artış göstermektedir (Şekil 7.19, 7.22 ve 7.25). Yapılan denemelerin temas açısı, temas açısı karmaşası, yüzey pürüzlülüğü ve serbest yüzey enerjisi ile ilişkisinin incelendiği bu denemelerde, deneme sonunda (720. s) yüzeyde meydana gelen yüzey kaplama oranı ile en yüksek ilişkiyi veren yüzey özelliği yüzey pürüzlülüğü ve buna bağlı en önemli parametre olan temas açısı karmaşasıdır (Şekil 7.20, 7.23, 7.26 (b ve c)). Şekil 7.19, 7.22, 7.25'ten görüldüğü üzere denemelerde temas açısı karmaşası arttıkça yüzey kaplama oranı da artmaktadır. Temas açısı karmaşasının artmasının, kondense olan damlacıkların yüzey kaplama oranını arttırması literatürle uyumludur [Zhao and Beysens, 1995]. 720. s sonunda meydana gelen yüzey kaplama oranı ile yüzey pürüzlülüğü ve temas açısı karmaşası arasındaki ilişki çiğlenme noktasının 1°C altında gerçekleştirilen denemelerde (%35-36, %38 ve %43 nem de) oldukça yüksek regresyon verirken [Şekil 7.20, 7.23 ve 7.26. (b ve c)], çiğlenme noktasının 7°C altında gerçekleştirilen denemede (%46-47 nem de) [Şekil 7.29. (b ve c)] bu regresyon düşmektedir. Aynı durum temas açısı karmaşası kadar yüksek regresyon vermese de yüzey kaplama oranı ile temas açısı arasında da görülmektedir [Şekil 7.20, 7.23, 7.26 ve 7.29 (a)]. Yüzeylerin serbest yüzey enerjisi ile kondensasyon sonunda meydana gelen yüzey kaplama oranı arasında ise böyle bir ilişki gözlenememiştir [Şekil 7.20, 7.23, 7.26 ve 7.29. (d)].

Burada %46-47 bağıl nemde çiğlenme noktasının 7°C altında gerçekleştirilen denemelerde damlalar arasında çok sayıda damla birleşmesi meydana gelmekte ve kondensasyon damla birleşmesi ağırlıklı gerçekleşmektedir. Öyleki bir süre sonra polimer yüzeyler damlalarla dolmakta ve yüzey kaplama oranı sabit bir değere ulaşmaktadır ve kullanılan polimer yüzeyler arasındaki fark görülememektedir. Oysaki çiğlenme sıcaklığına yakın şartlarda gerçekleştirilen denemelerde yüzey özellikleri ile olan ayırım daha iyi görülmekte ve kullanılan polimer yüzeyler arasındaki fark gözlenebilmektedir. Bu durum bölüm 7.1.2’de %63 bağıl nemde çiğlenme sıcaklığının hemen altında gerçekleştirilen damla kondensasyonu denemelerinde de bu şekildedir. Yüzey özelliklerinin ancak ve ancak tamamıyla sabitlenmiş çok hassas koşullarda ve çiğlenme sıcaklığının hemen altında ön planda olduğu görülmektedir.

7.3. Sabit %63 Bağıl Nemde Çiğlenme Sıcaklığındaki Tek Bir Damlacığın Büyümesinin İncelenmesi

Çalışmanın bu kısmında atmosferik koşullarda %63 sabit bağıl nemde polimer yüzeyler üzerine kondense olan izole ve etrafı diğer damlalarla sarılı tek bir damlacığın difüzyon kontrollü damla kondensasyonu ile büyümesi incelenmiştir. Difüzyon kontrollü damla buharlaşması için türetilen denklemlerin, polimer yüzeyler üzerinde çiğlenme sıcaklığının hemen altında yoğunlaşan tek bir damla için uygulanabilirliği test edilmiştir. Bu çalışmada ayrıca, izole damlaların büyüme hızı üzerine yüzey özelliklerinin etkisi ve tek damla etrafında çok sayıda damla varlığının kondensasyon hızı üzerine etkisi tespit edilmiştir.

7.3.1. İzole ve Etrafı Damlacıklarla Sarılı Damlaların Analizi

Bu denemeler, %63 bağıl nemde 19°C yüzey sıcaklığında çiğlenme noktasının hemen altında PP, HDPE, PPPE, LDPE ve EVA polimer yüzeyler üzerine kondense olan damlaların siyah-beyaz görüntülerinin verildiği Şekil 7.4-7.8’de her polimer yüzeyin 1. dk’sına ait resimden tek bir damla belirlenmesi ve bu damlanın büyüme davranışının 1’er dakika ara ile çekilen fotoğraflardan 12 dakika (720 s) boyunca incelenmesine dayanmaktadır. Seçilen damlanın etrafındaki boş alan, bu merkez

damlayı çevreleyen komşu damlalardan %100-%120 büyük olduğunda bu merkez damlaya “*izole damla*”; boyut olarak izole damla ile aynı boyda fakat etrafı diğer damlalarla sık istiflenmiş ve adeta sarılmış olduğunda ise bu merkez damlaya “*sarılı damla*” ismi verilmiştir. Tüm denemeler izole ve sarılı damlalar için ikişer set olarak gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar bu iki setin ortalama sonucu olarak rapor edilmiştir. Her bir polimer yüzey üzerinde seçilen izole ve sarılı damlalara ait üstten görünen yarıçap (plan radius), R , temas yarıçapı, r_b ve hacim, V değerleri (iki parametrelili küresel damla modeli kullanılarak (Eşitlik 6.1, 6.2 ve 6.3) hesaplanmıştır) ve bunların zamanla değişimi Çizelge 7.7-7.11’de verilmektedir. İzole ve sarılı damlalara ait ilk R yarıçap değerleri sırasıyla PP için 4,45 ve 3,80 μm , HDPE için 4,74 ve 4,39 μm , PPPE için 3,08 and 3,65 μm , LDPE için 5,44 and 5,15 μm ve EVA için 7,30 and 6,98 μm ’dir.

Çizelge 7.7. %63 bağıl nemde, PP yüzey üzerine kondense olan izole ve sarılı damlaların çapının, temas yarıçapının ve hacminin zamanla değişim değerleri.

	Zaman (s)	R (μm)	r_b (μm)	V (m^3) $\times 10^{-18}$
PP (İzole)	60	4,45	4,00	298,7
	120	4,76	4,28	366,0
	180	4,86	4,37	387,8
	240	5,15	4,63	462,1
	300	5,17	4,64	466,8
	360	5,41	4,86	535,1
	420	5,65	5,08	610,3
	480	5,72	5,14	632,9
	540	5,83	5,24	669,5
	600	5,82	5,23	667,5
	660	6,11	5,49	770,9
	720	6,16	5,54	791,8
PP (Sarılı)	60	3,80	3,42	186,2
	120	4,12	3,71	237,4
	180	4,22	3,80	254,9
	240	4,54	4,08	317,0
	300	4,51	4,06	311,4
	360	4,74	4,26	360,7
	420	5,02	4,51	428,1
	480	5,03	4,52	431,0
	540	5,30	4,77	504,2
	600	5,10	4,58	448,2
	660	5,34	4,80	515,6
	720	5,37	4,83	525,3

Çizelge 7.8. %63 bağıl nemde, HDPE yüzey üzerine kondense olan izole ve sarılı damlaların çapının, temas yarıçapının ve hacminin zamanla değişim değerleri.

	Zaman (s)	R (μm)	r_b (μm)	V (m^3) $\times 10^{-18}$
HDPE (İzole)	60	4,74	4,53	317,4
	120	6,32	6,05	754,5
	180	6,95	6,65	1004,3
	240	7,30	6,98	1162,6
	300	7,56	7,23	1291,2
	360	7,90	7,55	1472,2
	420	8,00	7,65	1529,4
	480	8,22	7,86	1659,2
	540	8,49	8,12	1826,4
	600	8,94	8,55	2135,9
	660	9,18	8,78	2310,8
	720	9,34	8,94	2436,8
HDPE (Sarılı)	60	4,39	4,20	252,6
	120	5,66	5,41	542,2
	180	6,16	5,89	697,7
	240	6,45	6,17	801,1
	300	6,63	6,34	871,1
	360	7,18	6,86	1103,3
	420	7,06	6,75	1050,6
	480	7,21	6,89	1117,7
	540	7,38	7,06	1201,6
	600	7,71	7,38	1370,7
	660	7,87	7,53	1458,0
	720	8,06	7,71	1564,0

Çizelge 7.9. %63 bağıl nemde, PPPE yüzey üzerine kondense olan izole ve sarılı damlaların çapının, temas yarıçapının ve hacminin zamanla değişim değerleri.

	Zaman (s)	R (μm)	r_b (μm)	V (m^3) $\times 10^{-18}$
PPPE (İzole)	60	3,08	2,98	84,7
	120	3,53	3,41	127,0
	180	4,12	3,98	202,3
	240	4,47	4,31	257,2
	300	4,84	4,67	327,5
	360	5,27	5,09	423,4
	420	5,60	5,41	507,6
	480	6,96	6,72	972,9
	540	7,05	6,81	1011,6
	600	7,18	6,94	1070,8
	660	7,37	7,12	1155,2
	720	7,70	7,43	1317,0
PPPE (Sarılı)	60	3,65	3,53	140,6
	120	4,19	4,05	212,8
	180	4,76	4,60	312,1
	240	5,20	5,02	405,7
	300	5,58	5,39	501,1
	360	6,02	5,82	630,8
	420	6,38	6,17	752,1
	480	6,45	6,23	775,0
	540	6,50	6,28	794,4
	600	6,61	6,39	835,1
	660	6,74	6,51	884,8
	720	7,05	6,81	1010,9

Çizelge 7.10. %63 bağıl nemde, LDPE yüzey üzerine kondense olan izole ve sarılı damlaların çapının, temas yarıçapının ve hacminin zamanla değişim değerleri.

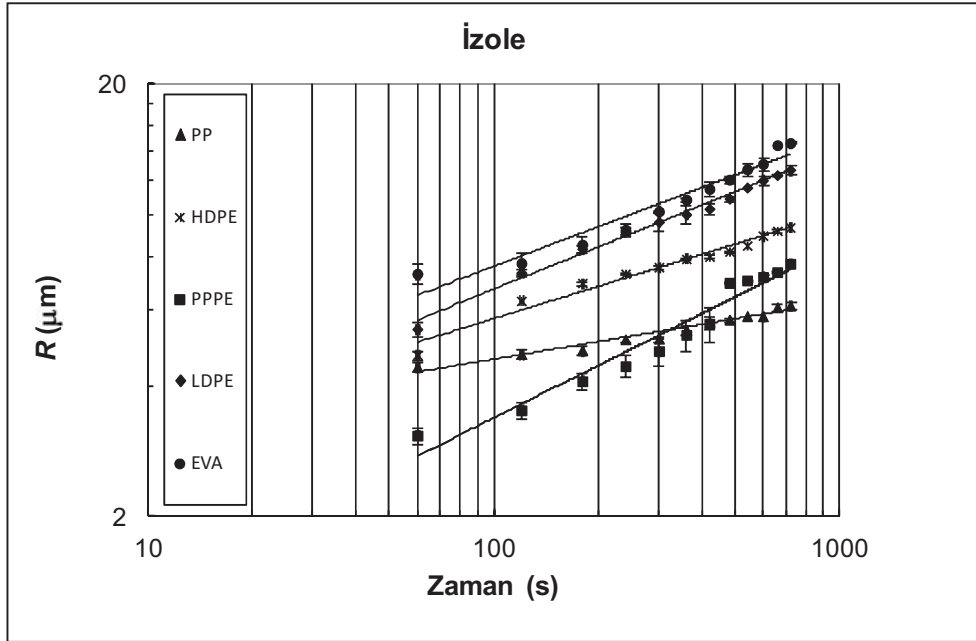
	Zaman (s)	R (μm)	r_b (μm)	V (m^3) $\times 10^{-18}$
LDPE (İzole)	60	5,44	5,34	433,2
	120	7,35	7,21	1064,9
	180	8,34	8,18	1557,3
	240	9,31	9,14	2167,6
	300	9,63	9,45	2396,8
	360	10,01	9,83	2698,1
	420	10,32	10,13	2954,2
	480	10,90	10,69	3474,5
	540	11,56	11,34	4146,3
	600	12,01	11,79	4652,0
	660	12,35	12,12	5057,4
	720	12,70	12,47	5507,1
LDPE (Sarılı)	60	5,15	5,05	366,5
	120	7,06	6,93	944,4
	180	8,03	7,88	1390,2
	240	8,91	8,75	1899,6
	300	9,14	8,97	2053,0
	360	9,66	9,49	2424,5
	420	9,91	9,72	2612,0
	480	10,41	10,22	3032,6
	540	10,97	10,77	3550,3
	600	11,33	11,12	3908,5
	660	11,78	11,56	4389,9
	720	12,12	11,90	4783,4

Çizelge 7.11. %63 bağıl nemde, EVA yüzey üzerine kondense olan izole ve sarılı damlaların çapının, temas yarıçapının ve hacminin zamanla değişim değerleri.

	Zaman (s)	R (μm)	r_b (μm)	V (m^3) $\times 10^{-18}$
EVA (İzole)	60	7,30	7,29	878,7
	120	7,72	7,71	1040,1
	180	8,53	8,52	1400,5
	240	9,17	9,16	1740,6
	300	10,18	10,17	2382,9
	360	10,84	10,82	2873,5
	420	11,47	11,46	3410,2
	480	12,06	12,04	3958,4
	540	12,74	12,72	4666,5
	600	13,11	13,09	5085,8
	660	14,48	14,46	6860,0
	720	14,64	14,62	7093,6
EVA (Sarılı)	60	6,98	6,97	769,5
	120	7,26	7,25	864,4
	180	8,02	8,01	1165,1
	240	8,41	8,40	1344,7
	300	9,39	9,38	1872,6
	360	9,93	9,92	2211,0
	420	10,51	10,50	2625,6
	480	11,33	11,31	3282,6
	540	12,05	12,04	3953,9
	600	12,52	12,50	4432,5
	660	13,30	13,28	5313,6
	720	13,74	13,72	5859,7

Literatürde izole olarak tanımlanan damlanın yarıçapının (R) damla birleşmesinin olmadığı veya ihmal edilebilir düzeyde olduğu yüzeylerde zamanın $(1/3)$ kuvvetiyle lineer olarak ($t^{1/3}$) büyüdüğü rapor edilmektedir [Beysens and Knobler, 1986; Beysens et al. 1991; Fritter et al. 1991; Steyer et al. 1991; Briscoe and Galvin, 1991; Briscoe and Galvin, 1991; Beysens, 1995; Beysens, 2006; Narhe et al., 2009]. Bizim çalışmamızda da damla birleşmesinin olmadığı şartlarda

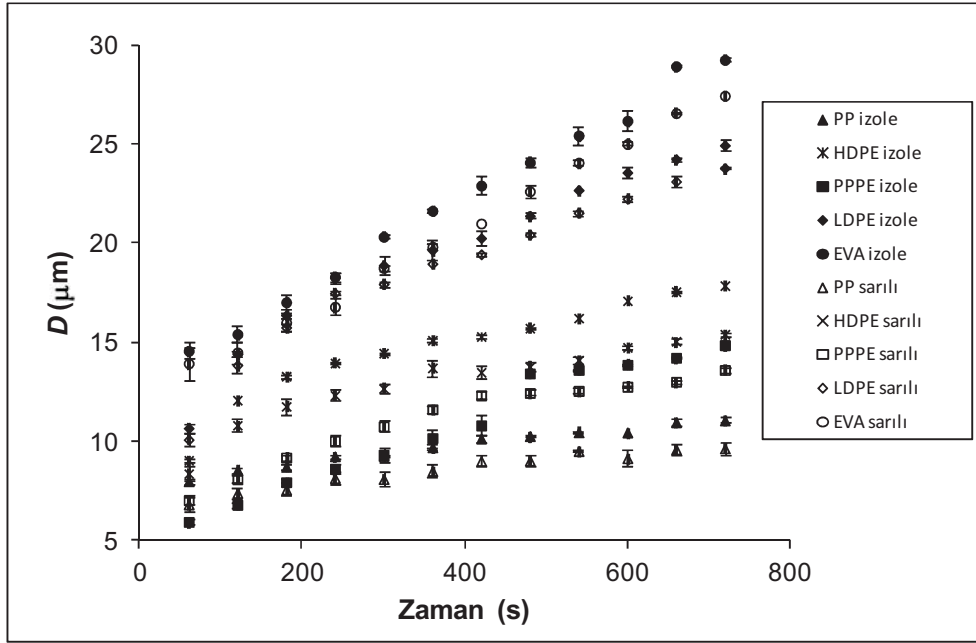
çiğlenme noktasının hemen altında difüzyonla damla büyümesi takip edildiğinden, izole damlaların yarıçapının zamana karşı büyümesini incelediğimiz logaritmik grafiklerde PP haricindeki polimer yüzeylerdeki izole damlaların yarıçapının zamanın (1/3) kuvvetiyle büyüdüğü doğrulanmaktadır (Şekil 7.30)



Şekil 7.30. %63 bağıl nemde, polimer yüzeylerdeki izole damlaların yarıçapının (R) zamanla değişimi.

Şekil 7.30’da elde edilen doğruların eğimleri PP, HDPE, PPPE, LDPE ve EVA yüzeyler için sırasıyla 0,13, 0,25, 0,40, 0,32 ve 0,30 olarak elde edilmiş olup; bu doğruların regresyon değerleri 0,94-0,99 arasındadır. PP yüzeyin istisnai davranışının sebebi, PP yüzeyinde birim alan başına kondense olan damla sayısının fazla olmasından kaynaklanmaktadır. İzole damlanın etrafındaki damlalar PP yüzey üzerindeki merkez izole damlanın etrafındaki boş alanı kısıtlamakta ve özgürce büyümesini engelleyerek büyüme hızını yavaşlatmaktadır.

Ayrıca polimer yüzeyler üzerinde seçilen izole ve sarılı damlaların temas çapı zamana karşı grafiğe geçirildiğinde; başta PP olmak üzere temas açısı histeresisi yüksek yüzeylerin (HDPE ve PPPE de de) temas çizgisinde tutunma davranışı sergiledikleri açıkça görülmektedir. Buna karşın temas açısı histeresisi düşük LDPE ve EVA yüzeylerde damla temas çapı lineer olarak büyümektedir çünkü temas çizgisinde herhangi bir tutunma meydana gelmemektedir (Şekil 7.31).



Şekil 7.31. %63 bağıl nemde, polimer yüzeyler üzerine kondense olmuş izole ve sarılı damlaların temas çapının zamana bağlı değişimi.

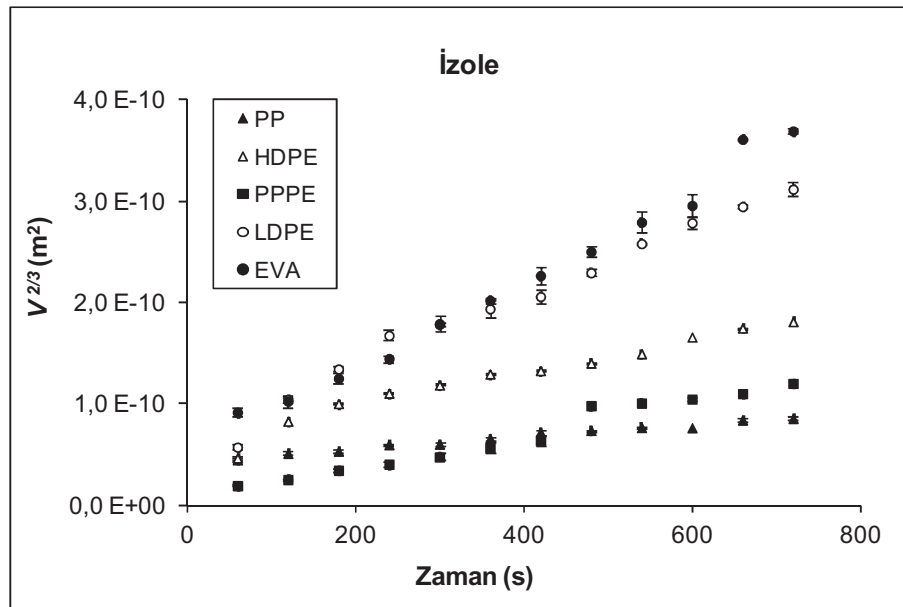
7.3.2. Difüzyon Denklemlerinin Damlacık Yoğunlaşmasında Kullanılması

Damla buharlaşmasında kullanılan difüzyon denklemlerin damla yoğunlaşmasında kullanılması ilk kez Sokuler ve arkadaşları tarafından temas açısı 90°'den büyük silanlanmış çok küçük bir AFM “tip”inin ucunda kondensasyonla meydana gelen çok küçük damlacıkların difüzyonla büyümesinde (damla birleşmesinin olmadığı kondensasyon şartlarında) uygulanmıştır ancak teoriden sapmalar rapor edilmemiştir [Sokuler et al., 2010]. Literatürde çok sayıdaki çalışmada difüzyon kontrollü şartlarda meydana gele tek bir damlanın buharlaşması sırasında damla hacminde meydana gelen azalma difüzyon eşitlikleri ile verilmektedir [Erbil, 2006; Picknett and Bexon, 1977; Erbil, 1998; McHale et al. 1998; Erbil et al., 2002; McHale et al., 2005; Erbil, 2012]. Sokuler ve arkadaşları, 2010, Eşitlik 5.34’ün ters versiyonunu kullanarak $V-t^{3/2}$ ilişkisini damla kondensasyonunda izole tek bir damlanın hacminde meydana gelen artışı göstermek için kullanmışlardır ve bu izole damlanın hacminin zamanın 3/2. kuvveti ile hızla arttığını rapor etmişlerdir. Ancak eğer ortamda birbirine komşu çok sayıda damla varsa ve bu komşu damlalar merkezdeki damlayı yakından sarıyorsa damla hacminde

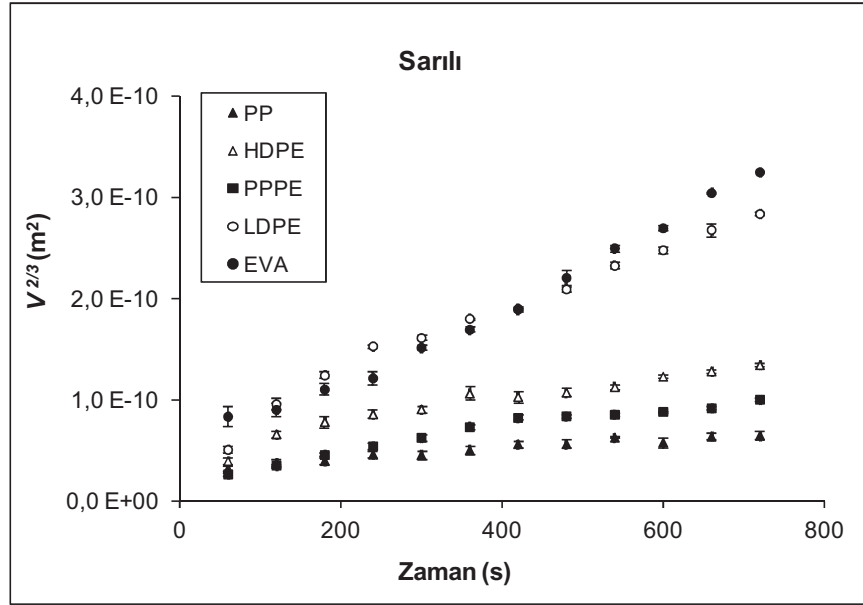
meydana gelen büyümenin yavaşladığını ve zamanın 1. kuvveti ile büyüdüğünü rapor etmişlerdir.

Biz de bu çalışmada kendi belirlediğimiz izole ve sarılı damlalarımız için Sokuler ve arkadaşlarının elde ettiği sonuçları destekleyen sonuçlar elde ettik. %63 bağıl nemde atmosfere açık ortamda çiğlenme noktasının hemen altında gerçekleştirilen denemelerde polimer yüzeylere kondense olan izole ve sarılı damlalarımızın zamana karşı hacimlerindeki büyüme Şekil 7.32’de ve elde edilen eğimler (dV/dt) ve ($dV^{2/3}/dt$) olarak Çizelge 7.12’de verilmektedir. Çizelge 7.12’de ayrıca izole ve sarılı damlaların etrafındaki boş alanda rapor edilmektedir.

Burada, denemeler boyunca damlaların temas yarıçapı değerleri, r_b , sürekli olarak arttığından damla kondensasyonunun sabit temas açısı modelinde yürüdüğünü kabul ettik ve Çizelge 2’de polimer yüzeyler için rapor edilen θ_e değerlerini sabit θ değerleri olarak kullandık. İzole ve sarılı damlaların hacimlerinin $2/3$. kuvvetinin ($V^{2/3}$) zamana karşı değişimini veren grafiklerde damla hacimlerinin lineer olarak değiştiğini görmekteyiz (Şekil 7.32).



Şekil 7.32. (a)



Şekil 7.32. (b)

Şekil.7.32. %63 bağıl nemde, (a) izole, (b) etrafı diğer damlalarla sarılı tekli damlaların hacminin zamanla artışı.

Çizelge 7.12. %63 bağıl nemde, izole ve sarılı damlaların etraflarındaki boş alanlar ve kondensasyon hızları.

	<i>İzole</i>			<i>Sarılı</i>		
	Boş Alan (m ²) x10 ⁻⁹	(dV/dt) (m ³ /s) x10 ⁻¹⁸	(dV ^{2/3} /dt) (m ² /s) x10 ⁻¹³	Boş Alan (m ²) x10 ⁻⁹	(dV/dt) (m ³ /s) x10 ⁻¹⁸	(dV ^{2/3} /dt) (m ² /s) x10 ⁻¹³
PP	1,55	0,74	0,61	0,76	0,52	0,49
HDPE	5,50	2,90	1,76	2,56	1,75	1,22
PPPE	3,14	2,02	1,65	1,46	1,29	1,08
LDPE	16,91	7,39	3,58	8,43	6,33	3,22
EVA	15,51	9,70	4,36	7,21	7,96	3,82

Bu grafiklerin Çizelge 7.12’de rapor edilen eğim değerleri ve difüzyon denklemleri kullanılarak ΔP ($\Delta P = P_{\infty}^v - P_o^v$) değerleri hesaplanmıştır. Bu denklemde ΔP değerlerinin hesaplanması için deney koşullarına ait değerler olan $D = 2,58 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, $M = 0,01802 \text{ kg/mol}$, $\rho = 997 \text{ kg/m}^3$, $T_{dış} = 299,5 \text{ K}$ kullanılmıştır. Elde edilen ΔP değerleri Çizelge 7.13’te gösterilmektedir. Çiğlenme noktasının hemen altında olduğumuz için elde edilen ΔP değerleri oldukça küçük

olup yüzey pürüzlülüğü, temas açısı ve temas açısı karmaşasındaki düşüşe bağlı olarak artmaktadır.

Çizelge 7.13. %63 bağıl nemde, polimer yüzeyler üzerine kondense olmuş izole ve sarılı damlalar için hesaplanan ΔP (Pa) değerleri ($T_{dış} = 299,5$ K).

Polimer	ΔP <i>İzole</i>	ΔP <i>Sarılı</i>
PP	0,10	0,08
HDPE	0,29	0,19
PPPE	0,26	0,18
LDPE	0,60	0,52
EVA	0,71	0,59

İzole damlalar için Çizelge 7.13'te rapor edilen ΔP değerleri ve Eşitlik 5.34 kullanılarak izole damlaların hacimlerinde meydana gelen eğimlerin teorik eğimden sapma yüzdeleri hesaplanmış ve bu sapmaların oldukça küçük seviyede olduğu görülmüştür (Çizelge 7.14).

Çizelge 7.14. %63 bağıl nemde, izole ve sarılı damlalar için teorik değerlerden % sapmalar.

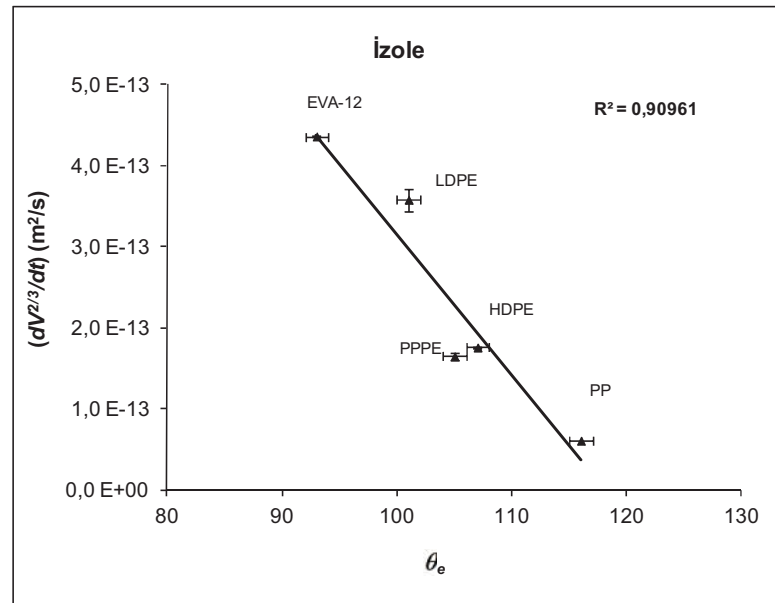
Polimer	<i>İzole</i> % sapma	<i>Sarılı</i> % sapma
PP	2,46	0,06
HDPE	1,44	0,29
PPPE	0,17	2,05
LDPE	0,58	0,45
EVA	0,18	0,97

Bu sonuç damla buharlaşmasında kullanılan difüzyon denklemlerinin damla yoğunlaşmasının çok yavaş gerçekleştiği çiğlenme sıcaklığının hemen altında gerçekleştirilen damla yoğunlaşmasına da başarılı bir şekilde uygulanabileceğinin bir göstergesidir. Burada elde edilen sapmaların düşük olması (%0,06-%2,46) çiğlenme sıcaklığının hemen altında çalışıyor olmamızdan kaynaklanmaktadır. Çünkü bu koşullarda doymun ortama ait buhar basıncı ile damlanın üzerindeki buhar basıncı arasındaki fark çok küçüktür (izole damlalar için 0,10-0,71 Pa arası, sarılı damlalar

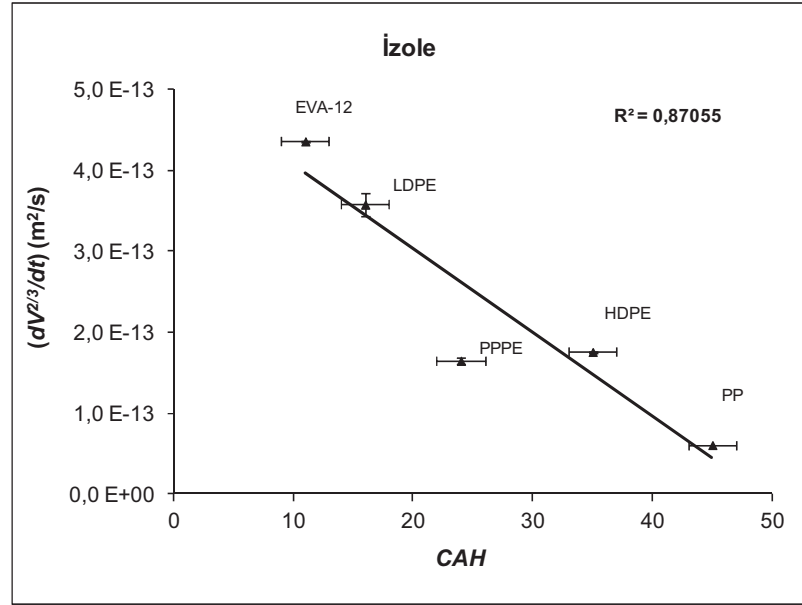
için 0,05-0,59 Pa arası) (Çizelge 7.13). Çünkü çiglenme noktasında damla yüzeyi üzerindeki buhar basıncı, P_o^v , ile satire ortama ait buhar basıncı, P_∞^v , arasındaki ΔP farkı çok küçüktür. Diğer bir ifadeyle yüzey üzerinde ölçülen sıcaklıkla dış ortam sıcaklığı arasındaki fark yoğunlaşmanın meydana gelebilmesi için gerekli minimum sıcaklık farkıdır. Yüzey sıcaklığındaki $0,01^\circ\text{C}$ 'lik değişim elde edilen ΔP değerlerinde büyük farklar meydana getirdiğinden teoriden sapmayı da arttıracaktır.

7.3.3. İzole Damlaların Büyüme Hızlarının Yüzey Özellikleri ile İlişkilendirilmesi

İzole tekli damlaların kondensasyonla büyüme hızlarının ($dV^{2/3}/dt$), üzerinde kondense oldukları yüzeyin temas açısı ile değişimini grafiğe geçirdiğimizde izole damlalar için kondensasyon hızının yüzeylerin temas açısındaki artışla, EVA>LDPE>HDPE>PPPE>PP sırasında düştüğünü görmekteyiz [Şekil 7.33 (a)]. Benzer ilişki damlaların büyüme hızının temas açısı karmaşasıyla değişiminde de görülmektedir [Şekil 7.33 (b)]. Elde edilen bu sonuçlar düşük θ_e değerlerine sahip olan yüzeylerde damla buharlaşmasının daha hızlı olduğunu rapor eden çalışmalarla da uyumluluk göstermektedir [Picknett and Bexon, 1977; Erbil, 1988; McHale et al. 1998; Erbil et al. 2002; Erbil, 2012].



Şekil 7.33. (a)



Şekil 7.33. (b)

Şekil. 7.33. %63 bağıl nemde, polimer yüzeyler üzerine kondense olan izole damlaların kondensasyon hızının ($dV^{2/3}/dt$), (a) temas açısı (θ_e), (b) temas açısı karmaşası (CAH) ile değişimi.

Halbuki toplam hacim grafiklerinde yüzey pürüzlülüğü ve dolayısıyla temas açısı karmaşası en yüksek olan yüzeyin en fazla hacim artışı verdiğini görmüştük (Şekil 7.15). Burada tam tersi bir durum elde etmemizin nedeni bu yüzeyler üzerine kondense olan damlaların sayılarının farklı olmasıdır (Çizelge 7.5). Örneğin PP yüzey üzerinde tek bir damla yavaş kondense olmaktadır ancak PP yüzey üzerine kondense olan damla sayısı en fazla olduğundan PP için toplam hacim artışı en yüksektir. Tersisi durum ise EVA yüzey için geçerlidir. Yani, EVA yüzey üzerinde tek bir damlanın kondensasyon hızı en yüksek iken; EVA yüzey üzerine kondense olmuş damla sayısı düşük olduğundan EVA yüzey üzerindeki toplam hacim artışı en düşüktür.

Olayı tekli izole damlaların kondensasyonu açısından incelediğimizde, yine karşımıza yüzey pürüzlülüğü çıkmaktadır. PP yüzey üzerinde birim alan başına kondense olan damla sayısının fazla olması, komşu damlaların PP yüzey üzerinde kondense olmuş tek bir damla etrafındaki boş alanı daraltması ve PP yüzeyde tek bir damlanın büyüme hızının düşmesine neden olmaktadır. Halbuki EVA yüzeyde birim alan başına kondense olan damla sayısı düşük olduğundan, izole damlalar etrafındaki

alan fazla olmakta ve damlalar özgürce büyüebilmektedirler. Bu nedenle EVA yüzey üzerine kondense olan bir izole damla PP yüzey üzerine kondense olan izole damladan daha hızlı büyümektedir [Şekil 7.32 (a)].

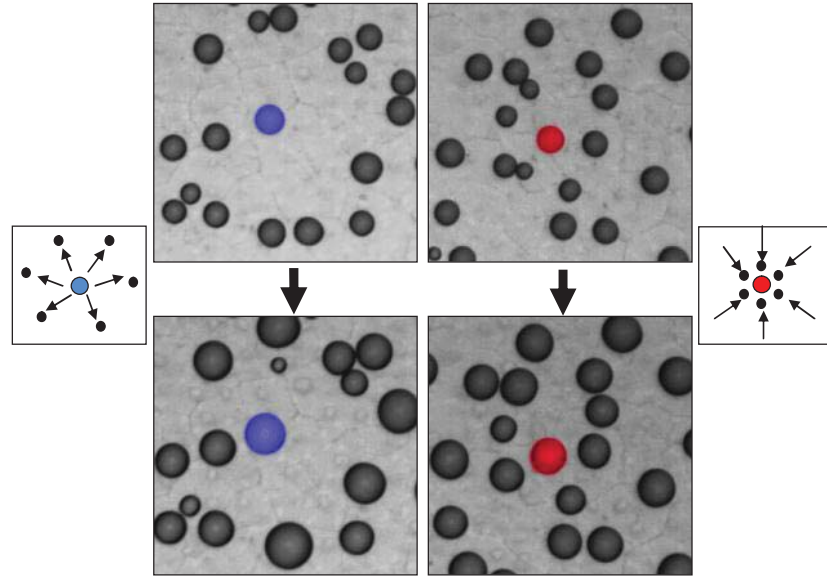
İlaveten, tekli damlaların kondensasyon hızına etki eden diğer bir faktör damlanın temas çizgisinde tutunmasıdır. Polimer yüzeyler üzerine kondense olmuş izole ve sarılı damlaların temas çapının zamana bağlı değişimini veren Şekil 7.31’de, temas çizgilerinde tutunma etkisinin olmadığı EVA ve LDPE yüzeylerde izole ve sarılı damlaların temas çapı lineer olarak artış gösterirken; temas çizgisinde tutunmaya uğrayan PP, HDPE ve PPPE yüzeylerde damla temas çapında beklenen artış görülememişti.

7.3.4. Etrafı Saran Komşu Damlaların Büyüme Hızına Etkisi

İzole damlaların büyüme hızına bu izole damlaların etrafını saran komşu damlaların etkisini inceleyebilmek için, merkez izole damlanın etrafı komşu damlalarla sarıldığında damlanın dV/dt kondensasyon hızında meydana gelen düşüşler hesaplanmış ve % değer olarak Çizelge 7.15’te verilmiştir. Şekil 7.34’te izole damlanın (mavi damla), sarılı damlaya (kırmızı damla) oranla kondensasyon sonunda daha fazla büyüdüğü ve komşu damlaların merkezdeki izole damlanın kondensasyon hızında düşüşe neden olduğu görülmektedir.

Çizelge 7.15. %63 bağıl nemde, komşu damla etkisinin kondensasyon hızında meydana getirdiği azalma.

Polimer	(dV/dt) (Kondensasyon Hızındaki % Azalma)
PP	29,7
HDPE	39,7
PPPE	36,1
LDPE	14,3
EVA	17,9



Şekil. 7.34. Komşu damla etkisi.

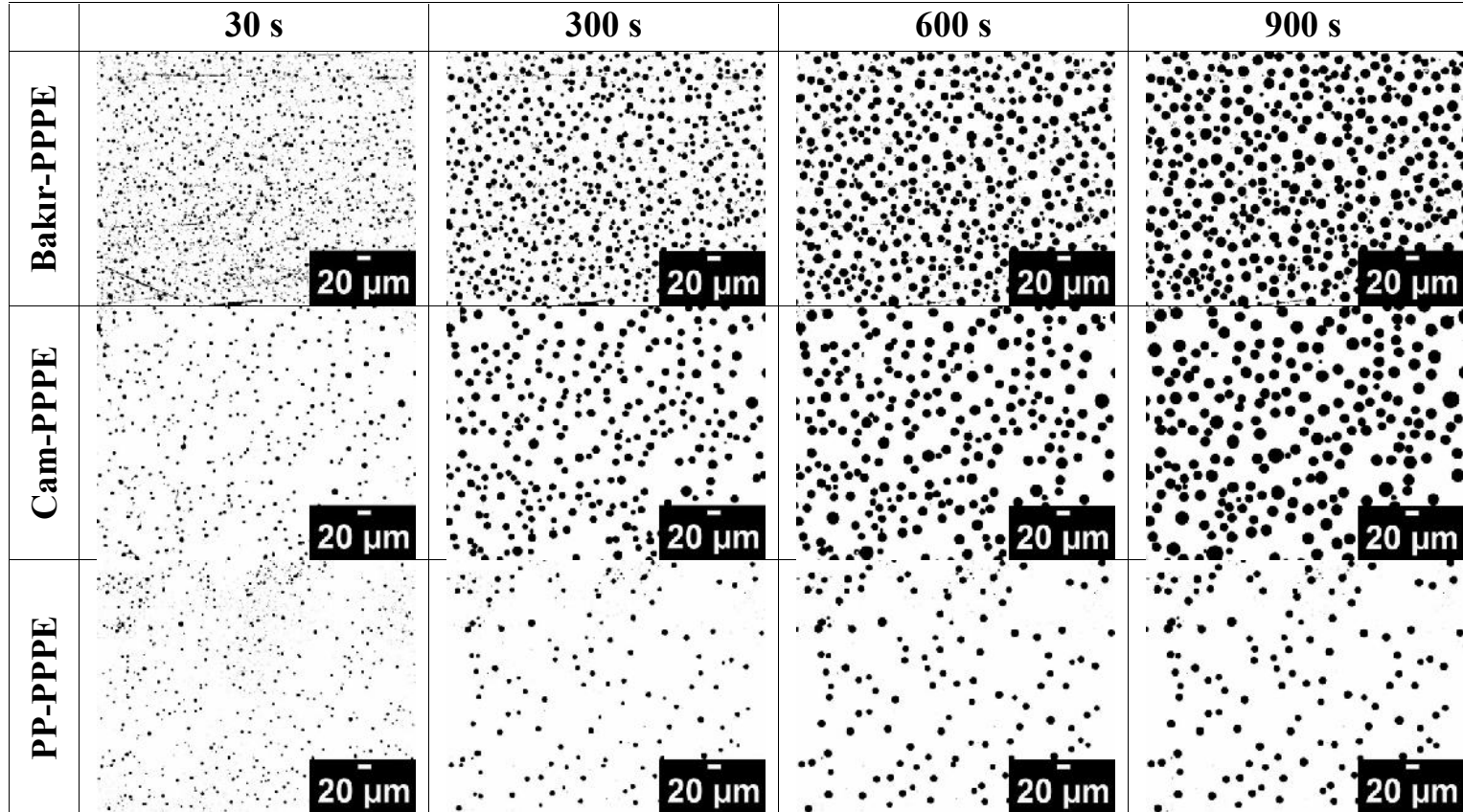
Çizelge 7.15 dikkatlice incelendiğinde komşu damla varlığının kondensasyon hızında %14-40 oranında bir düşüşe neden olduğu görülmektedir. Komşu damla varlığında kondensasyon hızında meydana gelen düşüş Şekil 7.32 (b)'de de görülmektedir. Teoriye göre, doğrudan difüzyonla büyüyen damlalar üzerine ortamda mevcut su buharı, damla çevresinden yani yüzeye paralel yönlerden gelir. Eğer merkezdeki damlanın etrafında paralel yönde gelen su buharıyla kondense olmuş ve sık istiflenmiş çok sayıda damla buluyorsa bunlar merkez damlanın üzerine gelen su buharını absorblayarak merkezdeki damlanın özgürce büyümesine engel teşkil ederler. Kondensasyon hızında meydana gelen düşüşün temel sebebi budur [Beysens, 1995; Beysens, 2006]. Kondensasyon hızındaki azalma daha ziyade yüzey pürüzlülüğü ve dolayısıyla temas açısı ve temas açısı karmaşası yüksek yüzeylerde (PP, HDPE ve PPPE) daha fazla seyretmektedir. Bu sonuç literatürle de uyumludur [Beysens, 1995; Sokuler et al. 2010; Frassy et al. 2006]. LDPE ve EVA yüzeylerde birim alan başına kondense olan damla sayısı düşük olduğundan (Çizelge 7.5); komşu damla etkisi %18'den daha azdır. Birim alan başına damla sayısı yüksek olan PP, HDPE ve PPPE yüzeylerde kondense olan damlaların etrafında çok sayıda damlacık olduğundan, bunlar merkezdeki damlanın özgürce büyümesini baskılamaktadır. Etrafı sarılı damlalar söz konusu olduğunda büyüme hızında meydana gelen düşüş Şekil 7.32 (b)'de de görülmektedir. Sonuç olarak merkez damla etrafındaki çok sayıda damla varlığı kondensasyon hızında bir düşüş meydana getirmektedir.

7.4. Aynı Polimerin (PPPE) Üzerinde Damla Kondensasyon Hızına Altındaki Isı Transfer Katsayıları Birbirinden Farklı Katıların Etkisi

Çalışmanın bu kısmında, aynı polimerin (PPPE) üzerinde meydana gelen damla kondensasyon hızına alttaki ısı transfer katsayısı farklı katı yüzeylerin etkisi incelenmiştir.

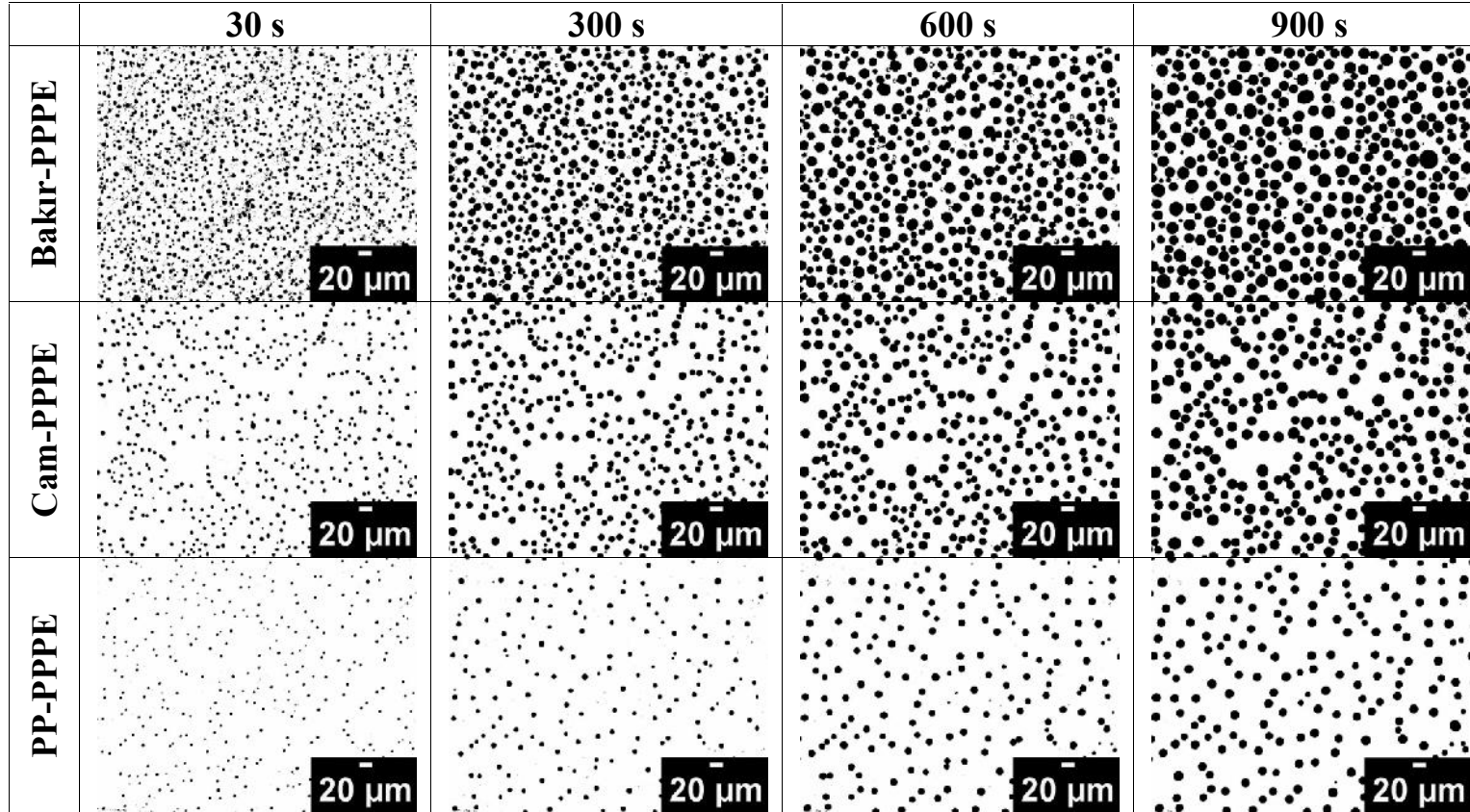
Bakır, cam ve PP plaka üzerine 10mg/ml konsantrasyonda kaplanan PPPE polimerinin üzerinde kondense olan damlaların 200x büyültmedeki indikatif fotoğrafları %42-43 bağıl nem de ve çiğlenme sıcaklığının 1°C, 2°C ve 3°C altında olmak üzere Şekil 7.35-7.37’de gösterilmiştir. Fotoğraflardan da anlaşıldığı üzere çiğlenme sıcaklığının altına düşüldükçe ilk fotoğraflarda birim alan başına kondense olan damla sayısı artmakta ve kondense olan damlaların çapları büyümektedir. Çizelge 7.16’da çiğlenme noktasının 1°C, 2°C ve 3°C altında bu yüzeyler üzerine ilk 30 s’de birim alan başına kondense olan damlaların sayıları ve yüzey pürüzlülüğü değerleri verilmektedir.

$\Delta T_{\text{çiğ}}: -1^{\circ}\text{C}$ (RH: % 42-43, $T_{\text{dış}}: 23-23,2^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{çiğ}}: 9,5^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{yüzey}}: 8,5^{\circ}\text{C}$, $\Delta T: 14,5^{\circ}\text{C}$)



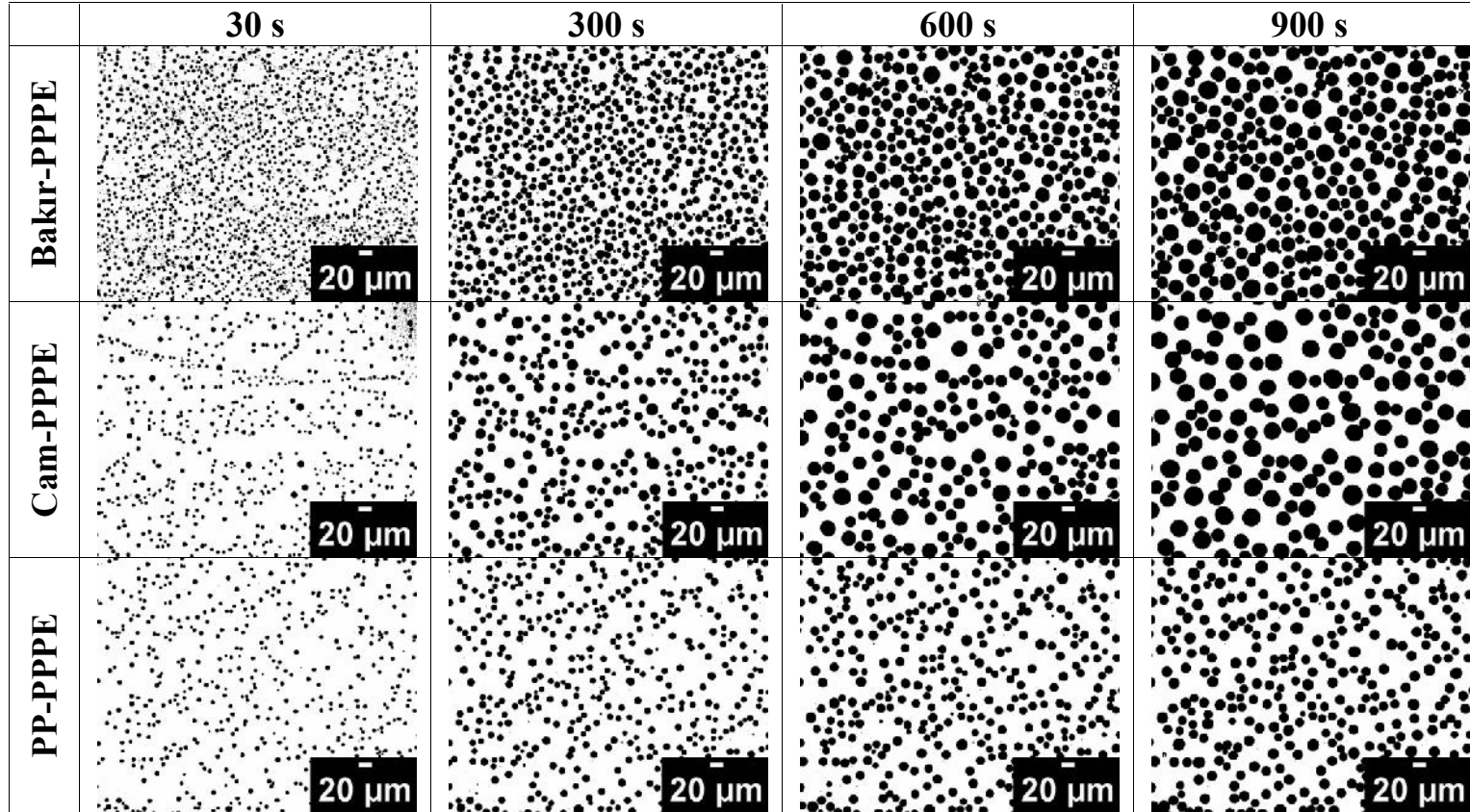
Şekil 7.35. %42-43 bağıl nemde, bakır, cam ve PP plaka üzerine kaplanan PPPE polimerinin çiğlenme sıcaklığının 1°C derece altında $200\times$ büyültmede çekilen optik mikroskop görüntüleri.

$\Delta T_{\text{çığ}}: -2^{\circ}\text{C}$ ($RH: \% 42-43$, $T_{\text{dış}}: 21-22^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{çığ}}: 7,5^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{yüzey}}: 5,5^{\circ}\text{C}$, $\Delta T: 15,5-16,5^{\circ}\text{C}$)



Şekil 7.36. %42-43 bağıl nemde, bakır, cam ve PP plaka üzerine kaplanan PPPE polimerinin çığlenme sıcaklığının 2°C derece altında $200\times$ büyültmede çekilen optik mikroskop görüntüleri.

$\Delta T_{\text{çığ}}: -3^{\circ}\text{C}$ ($RH: \% 42-43$, $T_{\text{dış}}: 23^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{çığ}}: 9,5^{\circ}\text{C}$, $T_{\text{yüzey}}: 6,5^{\circ}\text{C}$, $\Delta T: 16,5^{\circ}\text{C}$)

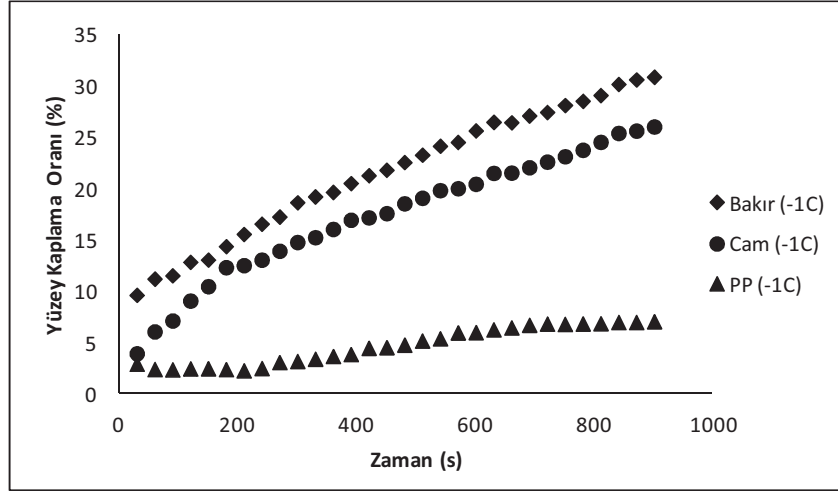


Şekil 7.37. %42-43 bağıl nemde, bakır, cam ve PP plaka üzerine kaplanan PPPE polimerinin çığlenme sıcaklığının 3°C derece altında $200\times$ büyültmede çekilen optik mikroskop görüntüleri.

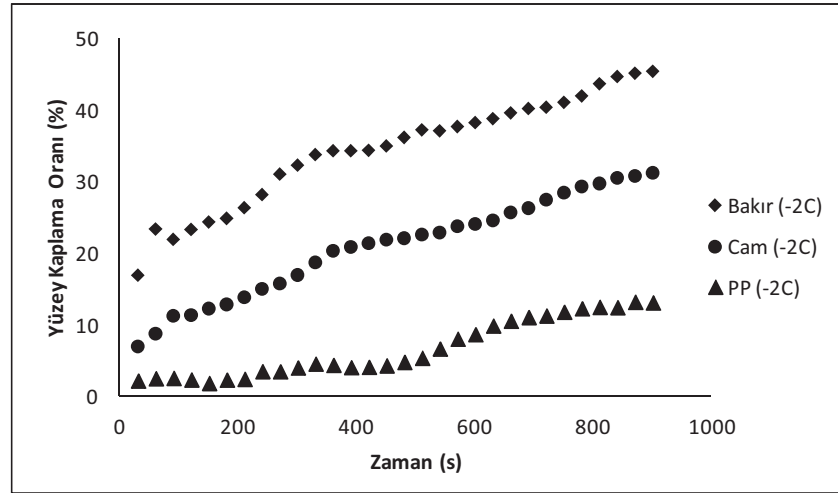
Çizelge 7.16. %42-43 bağıl nemde, bakır, cam ve PP plaka üzerine kaplanan PPPE polimerinin yüzey pürüzlülüğü parametreleri ve çiğlenme sıcaklığının 1°C, 2°C ve 3°C altında bu yüzeyler üzerinde birim alan başına kondense olan damlaların sayısı.

Malzeme	R_{rms}	R_a	R_t	R_p	R_v	N $\Delta T_{\text{çiğ}}:$ -1°C	N $\Delta T_{\text{çiğ}}:$ -2°C	N $\Delta T_{\text{çiğ}}:$ -3°C
Bakır PPPE	0,28	0,22	2,02	1,06	-0,96	1540	1602	1832
Cam-PPPE	0,14	0,09	2,85	0,87	-1,98	381	522	-
PP-PPPE	0,18	0,12	3,23	2,06	-1,17	480	350	461

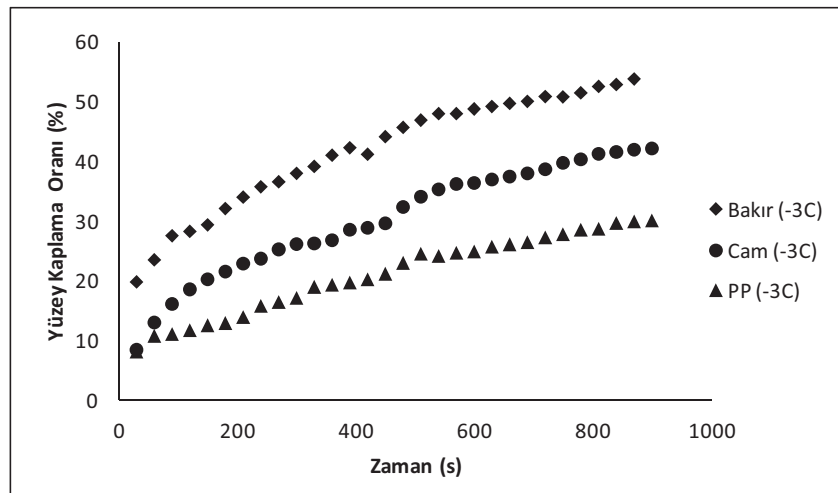
Bakır, cam ve pp üzerine kaplı PPPE yüzeylere çiğlenme noktasının 1°C, 2°C ve 3°C altında kondense olan damlaların meydana getirdiği yüzey kaplama oranları çiğlenme sıcaklığından uzaklaştıkça beklendiği gibi artmaktadır [Şekil 7.38 (a-c)]. Tüm denemelerde bakırın yüzey kaplama oranı en yüksek ısı transfer katsayısına sahip olmasından dolayı en yüksek, polipropileninki ise en düşük ısı transfer katsayısına sahip olduğundan dolayı en düşüktür. Yüzey kaplama oranları arasındaki ayrımlarda çiğlenme sıcaklığının 2°C derece altı için oldukça belirgin farklar gözlenmektedir.



Şekil 7.38. (a)



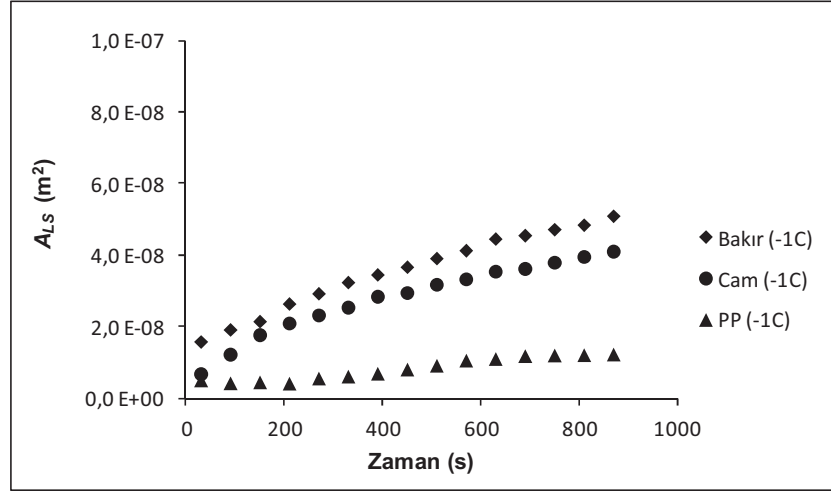
Şekil 7.38. (b)



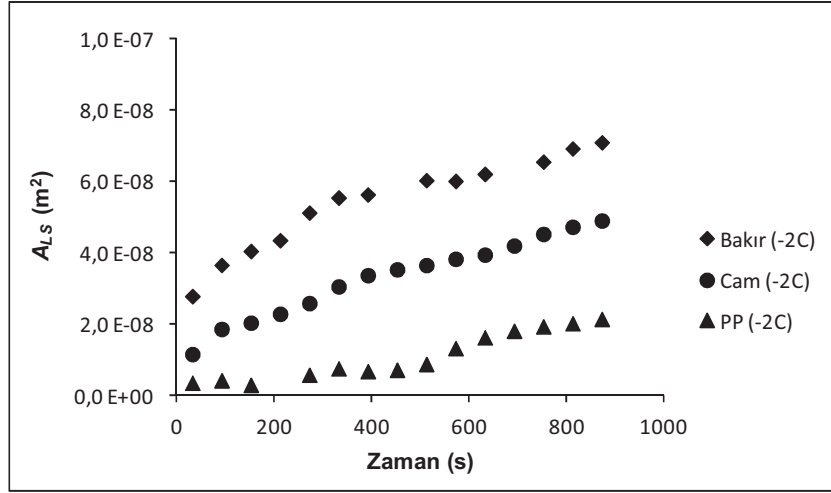
Şekil 7.38. (c)

Şekil 7.38. %42-43 bağıl nemde, PPPE kaplı bakır, cam ve PP plaka üzerine çiğlenme sıcaklığının (a) 1°C, (b) 2°C ve (c) 3°C altında kondense olmuş su damlalarının yüzey kaplama oranlarının zamana karşı değişimi.

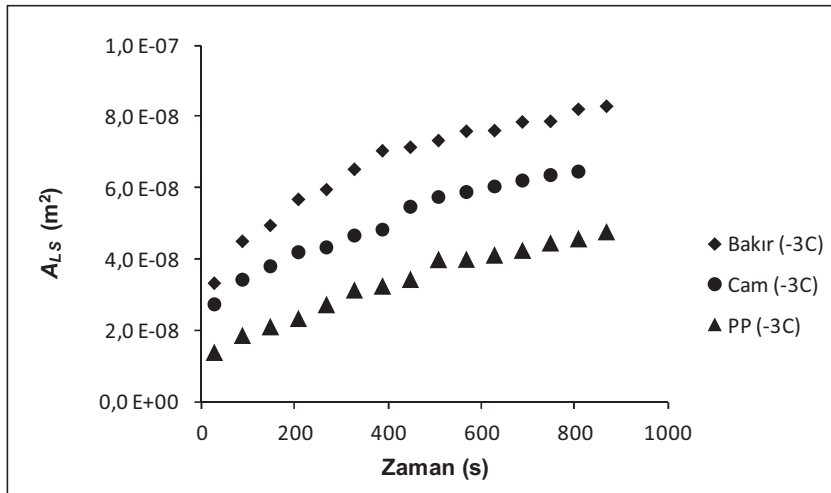
Kondense olan damlaların sıvı-katı ara yüzeyindeki toplam alanları ve toplam hacimlerinin zamana karşı değişimi sırasıyla Şekil 7.39 (a-c) ve 7.40 (a-c)'de verilmektedir. Grafiklerden de anlaşıldığı üzere bakır üzerinde kondense olan damlaların toplam alanı ve toplam hacmi ısı transfer katsayısı çok yüksek olduğundan cam ve PP plaka üzerinde kondense olan toplam alan ve hacim değerlerinden beklendiği gibi daha yüksektir. Çizelge 7.16'dan içlerinde en pürüzsüz olanın cam olduğu açıkça görülmektedir. En pürüzlü olan bakır ise pürüzlülüğünden ötürü yüzeyinde daha fazla damla çekirdeklenmesi ihtiva etmektedir. Yüzeyler üzerine birim alan başına kondense olan damla sayısı çığlenme sıcaklığının 1°C derece altında Bakır üstü PPPE>PP üstü PPPE>Cam üstü PPPE şeklindedir ve bu sonuç R_{rms} yüzey pürüzlülüğü değerleri ile de aynı doğrultuda sıralanış göstermektedir (Çizelge 7.16). Alttaki malzeme ayrımı özellikle çığlenme noktasının özellikle 2°C altında bakırdan PP ye doğru beklendiği şekilde gözlemlenebilmektedir [Şekil 7.38. (b)].



Şekil 7.39. (a)

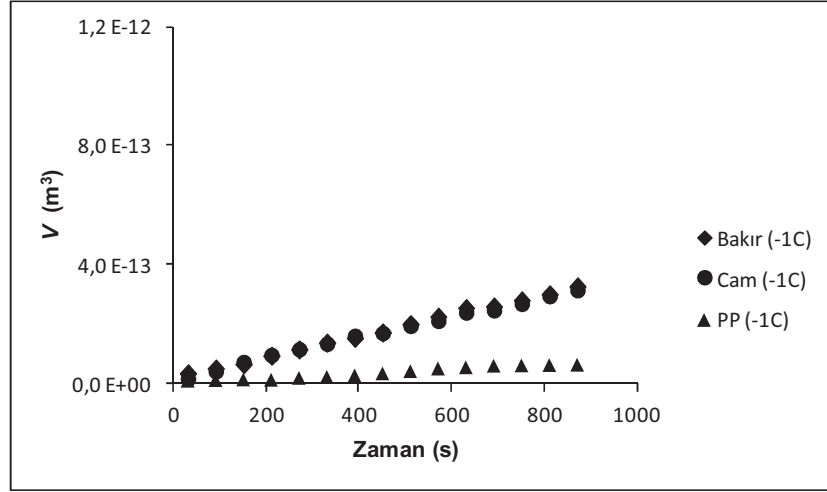


Şekil 7.39. (b)

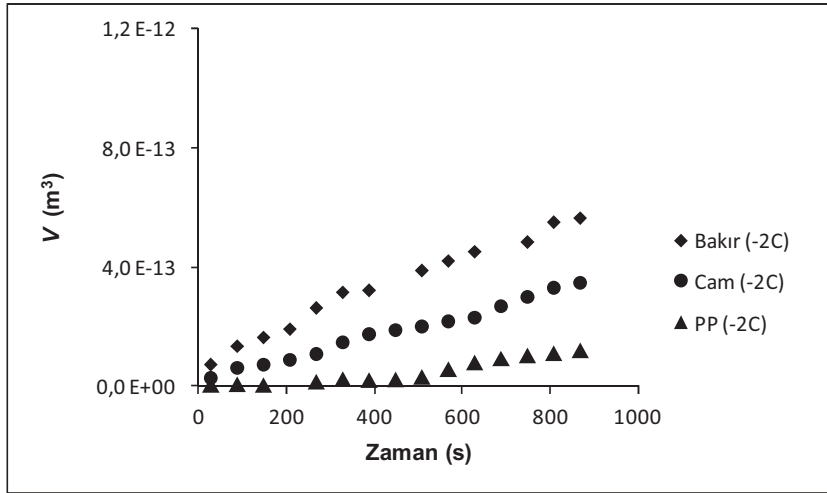


Şekil 7.39. (c)

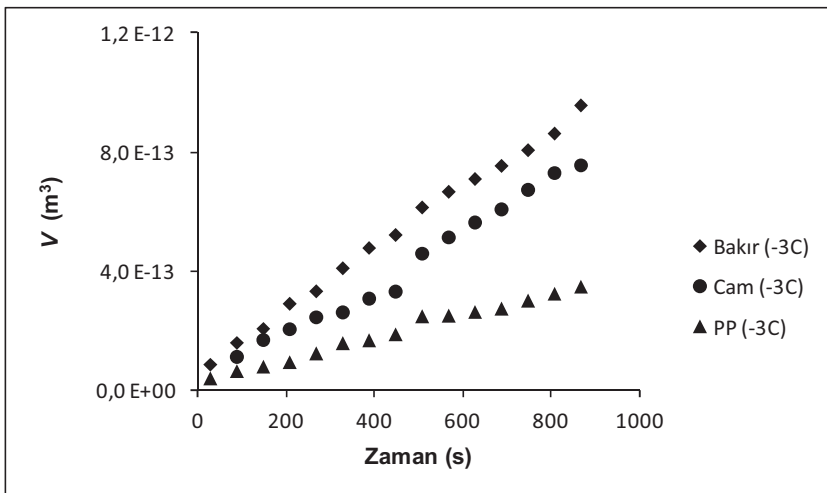
Şekil 7.39. %42-43 bağıl nemde, bakır, cam ve PP plaka üzerine kaplanan PPPE polimerine çiğlenme sıcaklığının (a) 1°C, (b) 2°C ve (c) 3°C altında kondense olan damlaların sıvı-katı ara yüzeyindeki toplam alanlarının zamana bağlı değişimi.



Şekil 7.40. (a)



Şekil 7.40. (b)



Şekil 7.40. (c)

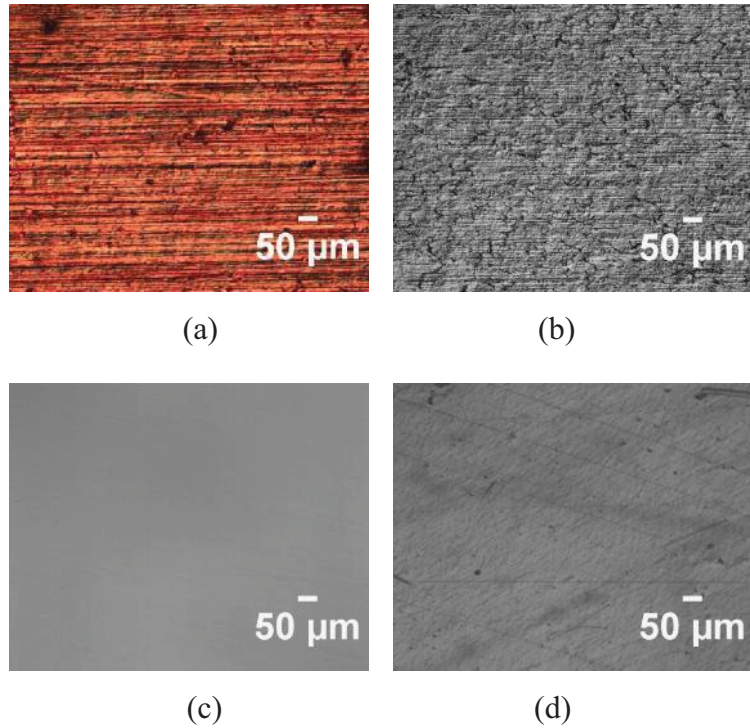
Şekil 7.40. %42-43 bağıl nemde, bakır, cam ve PP plaka üzerine kaplanan PPPE polimerine çiğlenme sıcaklığının (a) 1°C, (b) 2°C ve (c) 3°C altında kondense olan damlaların toplam hacimlerinin zamana bağlı değişimi.

7.5. Metal ve Polimer Yüzeyler Üzerinde Su Toplama Denemeleri

Çalışmanın bu kısmında metal ve polimer yüzeyler üzerinde su toplama denemeleri gerçekleştirilmiş ve bunların sonuçları tartışılmıştır.

7.5.1. Bakır Hücre Kullanılarak Yapılan Su Toplama Denemelerinin Sonuçları

Su toplama denemeleri ilk olarak aynı kalınlığa sahip (1 mm) bakır, cam ve polipropilen plaka üzerinde sabit nem ve yüzey sıcaklığı koşullarında gerçekleştirilmiştir. Bu yüzeylere ait 100x büyültmede çekilmiş optik mikroskop fotoğrafları Şekil 7.41 (a-d)'de ve bu yüzeylerde ölçülen temas açısı ölçüm sonuçları ve Çizelge 7.17'de verilmektedir.



Şekil 7.41. Su toplama denemelerinin gerçekleştirildiği (a) bakır, (b) çelik, (c) cam ve (d) polipropilen yüzeylerin 100x büyültmede çekilmiş optik mikroskop görüntüleri.

Çizelge 7.17. Bakır, çelik, cam ve polipropilen yüzeylerine ait temas açısı ölçüm sonuçları.

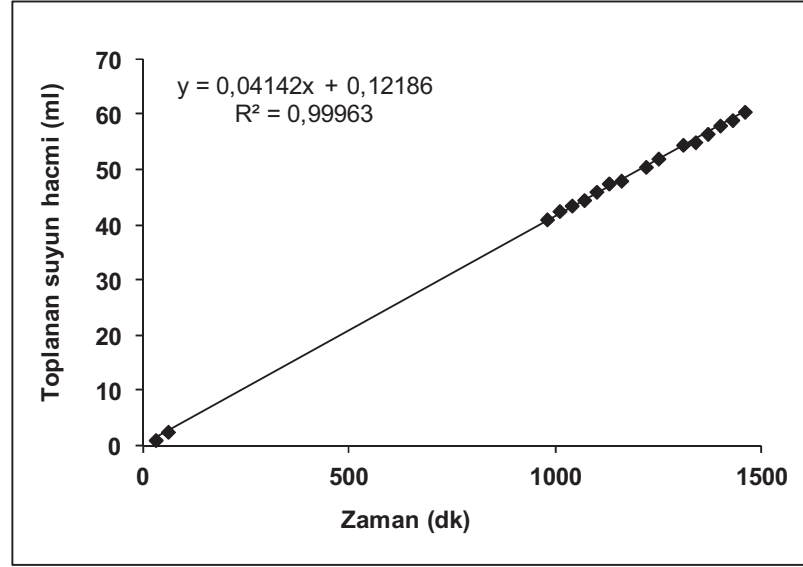
Katı Yüzey	θ_e	θ_a	θ_r	CAH
Bakır Plaka	98	104	65	39
Çelik Plaka	83	91	33	58
Cam Lamlar	39	41	12	29
PP Tabaka	90	92	56	36

İlk olarak tuz çözeltileriyle %50 sabit neme ayarlanmış ortamda gerçekleştirilen denemelerde birim alandan birim zamanda toplanan su miktarları karşılaştırılmış; damla tipi kondensasyonun meydana geldiği polipropilen plaka üzerinde maksimum miktarda su toplanmıştır (Çizelge 7.18). Sonrasında su ile bağlı nemi %75-77 nem koşullarına sabitlenmiş ortamda aynı denemeler tekrarlanmış bu denemelerde de en yüksek su miktarı polipropilen plaka üzerinde elde edilmiştir (Çizelge 7.18).

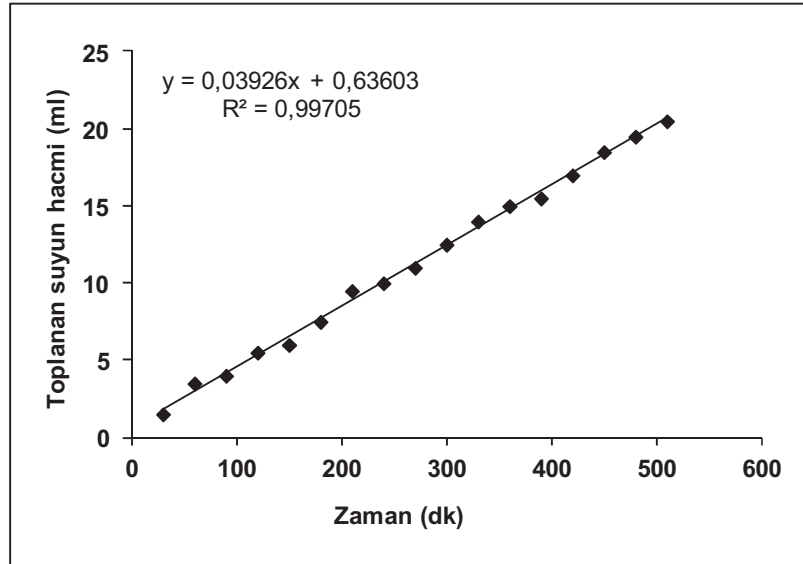
Çizelge 7.18. Bakır, çelik, cam ve polipropilen plakalarda %50 ve %75 bağlı nemlerde toplanan su miktarları.

Katı Yüzey	RH %	$T_{dış}$	$T_{yüzey}$ (°C)	$T_{çığ}$	ΔT	$\Delta T_{çığ}$	g/m ² min	dV/dt
Bakır Plaka	51	21	2	10,5	19	-8,5	1,16	-
Çelik Plaka	50	21	2	10	19	-8	1,17	0,02098
Cam Lamlar	51	21	2	10,5	19	-8,5	1,13	0,02132
PP Tabaka	50	21	2	10	19	-8	1,5	0,02944
Bakır Plaka	75	21	2	16,5	19	-14,5	2,10	0,04142
Çelik Plaka	77	21	2	17	19	-15	2,03	0,03926
Cam Lamlar	77	21	2	17	19	-15	1,84	0,03620
PP Tabaka	75	21	2	16,5	19	-14,5	2,14	0,03989

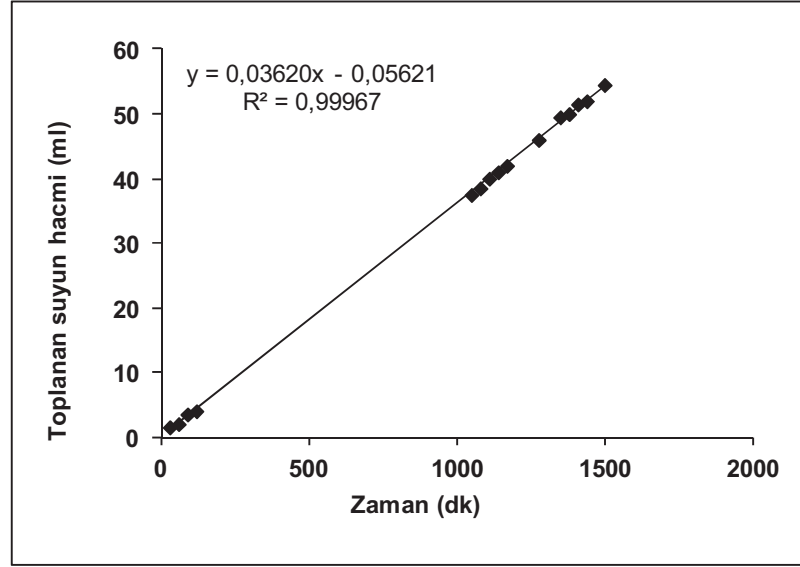
Bu denemelerde ilaveten %75-77 sabit nem ve yüzey sıcaklığı koşulları altında yüzeylere kondense olan su miktarının zamana karşı grafikleri de çizilmiş, oldukça yüksek korelasyonda lineer bir doğru verdiği tespit edilmiştir. Buda bize elde edilen doğruların eğimlerinden farklı materyaller için kondensasyon hızlarının karşılaştırılmasına imkan vermiştir [Şekil 7.42 (a-d)].



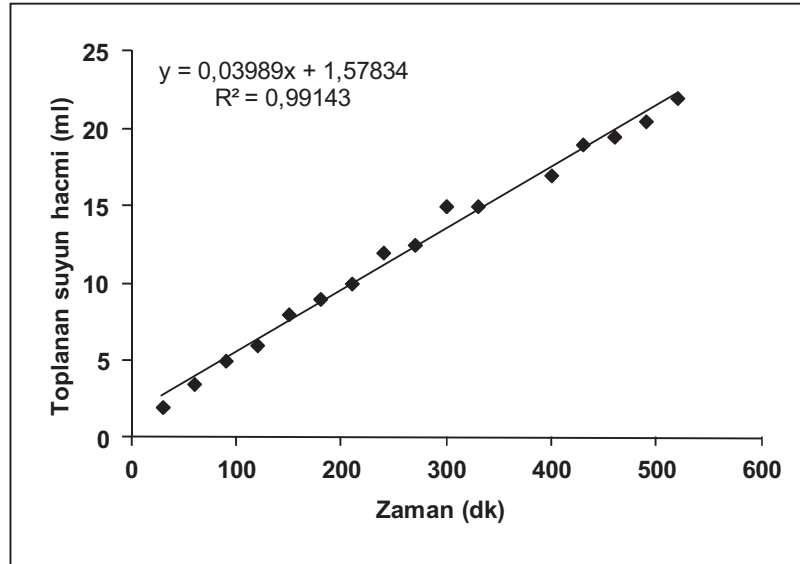
Şekil 7.42. (a)



Şekil 7.42. (b)



Şekil 7.42. (c)



Şekil 7.42. (d)

Şekil 7.42. Bakır sistem üzerine yerleştirilen (a) bakır, (b) çelik, (c) cam, (d) polipropilen tabakalar üzerinde %75-77 bağıl nemde sabit sıcaklıkta toplanan suyun zamana karşı değişimi.

%75-77 sabit nemde ve sabit sıcaklık koşulları altında yapılan denemelerde birim zamanda birim metrekare başına toplanan su miktarlarının, bağıl nemi tuz çözeltisi ile %50-51 neme sabitlenmiş ortama göre beklenildiği gibi attığı gözlemlenmiştir (Çizelge 7.18). Ancak katı yüzeyler üzerinden toplanan su miktarları arasındaki farklar beklenildiği gibi çok fazla çıkmamıştır. Sonuçlardan da görüldüğü üzere bakır ve çelik plakalar üzerinde toplanan su miktarları ve kondensasyon hızları

polipropilen materyalinde elde edilen sonuçlarla çok fazla fark etmemektedir. (Birim zamanda birim metrekare başına toplanan suyun miktarı bakır için $2,10 \text{ g/m}^2 \text{ dk}$, çelik için $2,03 \text{ g/m}^2 \text{ dk}$, kondensasyon hızları ise bakır için $0,04142 \text{ ml/dk}$, çelik için $0,03926 \text{ ml/dk}$). Cam kullanıldığında ise birim zamanda birim metrekare başına toplanan suyun miktarı bakır, çelik ve polipropilen materyallerine oranla biraz daha düşük çıkmıştır ($1,84 \text{ g/m}^2 \text{ dk}$), yine kondensasyon hızı da bu materyallere göre biraz daha düşüktür ($0,03620 \text{ ml/dk}$).

Denemeler sonucunda her ne kadar kullanılan katı yüzeyin etkisi istenen ölçüde gözlenemese de; birim zamanda metrekare başına toplanan suyun hacmi Vargas ve arkadaşları [1998] tarafından TiO_2 ve BaSO_4 emdirilmiş PE folyo üzerinde gerçekleştirilen su toplama denemelerinde elde edilen değerlere yakındır. Vargas ve arkadaşları 1 ayda metrekare başına $1,43 \text{ lt}$ su toplamış olup, hesap yaptığımızda bu $0,0331 \text{ ml/dk}$ 'ya karşılık gelmektedir. Bu sonuç bizim polipropilen materyali kullanarak %75-77 nemde elde ettiğimiz sonuçtan ($0,03989 \text{ ml/dk}$) %21 sapmaktadır. Ancak onların yaptığı denemelerde 1 ay içerisinde havadaki nem hava koşullarına bağlı olarak %70 ile %100 arasında değişmektedir. Bizim sabit nemde gerçekleştirdiğimiz denemeler ile tam bir karşılaştırma yapılamaz ancak böyle yakın değerler çıkması yaptığımız çalışmanın literatürle uyumlu sonuçlar verdiği göstermektedir.

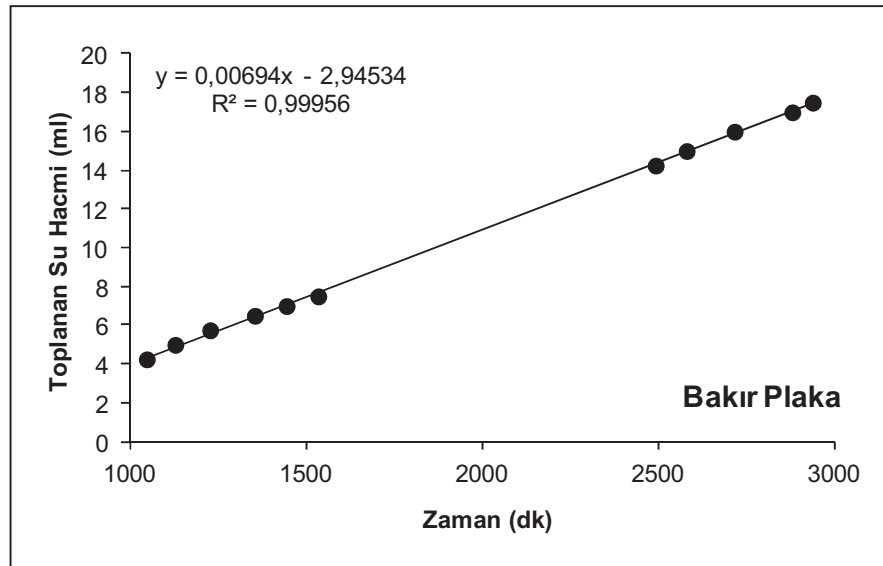
%50 ve %75 bağıl nemlerde gerçekleştirilen su toplama denemelerine ait toplu sonuçların verildiği Çizelge 7.18 dikkatlice incelendiğinde denge temas açısı değerleri, θ_e , birbirine yakın olan bakır, çelik ve polipropilen plakalarda elde edilen kondensasyon hızları ve birim zamanda birim metrekare başına toplanan su miktarları birbirine çok yakındır. Temas açısı bu materyallerden fazlasıyla düşük ve hidrofilik bir malzeme olan cam yüzeyler üzerinde ise elde edilen kondensasyon hızı ve birim zamanda birim metrekare başına toplanan suyun miktarı diğer katı yüzeylere göre daha düşüktür ancak bu düşüş beklenildiği kadar fazla değildir. Bu sonuçlardan çiğlenme noktasından uzak koşullarda (%75 nem için, $T_{\text{yüzey}}: 2^\circ\text{C}$, $\Delta T: 19^\circ\text{C}$, $\Delta T_{\text{çiğ}}: -14,5^\circ\text{C}$) kullandığımız sistem çiğlenme noktasından çok uzak koşullarında su üretmeye mecbur bırakıldığından katı yüzey etkisinin gözlenemeyecek düzeye indiği düşünülmüş ve bundan sonra gerçekleştirilecek denemelerin çiğlenme noktasına daha yakın sıcaklıklarında gerçekleştirilmesi ve

böylece katı yüzey etkisinin ön plana çıkarılarak aradaki farkların daha rahat gözlemlenebileceği düşünülmüştür.

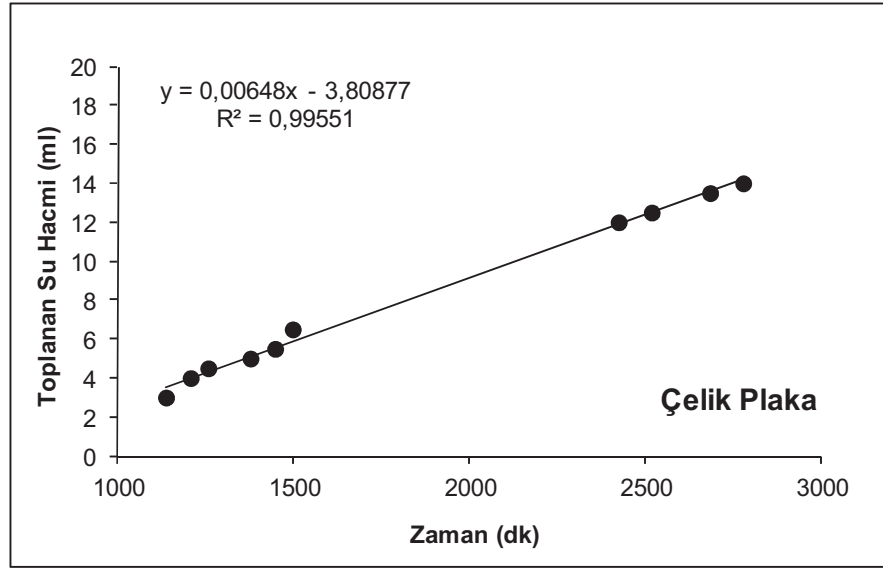
Bu amaçla %90 bağıl nem koşullarında ΔT farkını 2,5°C gibi düşük bir değere düşürerek, çiğlenme noktasının 1°C altında denemeler tekrarlanmıştır ($T_{dış}$: 22,5°C, $T_{yüzey}$: 20°C, $T_{çığ}$: 21°C). Bu denemelerde ilave olarak yüzeyinde 110° temas açısına sahip PP ve 150° temas açısına sahip süperhidrofobik PP materyalleri de kullanılmıştır. Daha yüksek yüzey sıcaklıklarında gerçekleştirilen bu denemeler sonucunda elde edilen katı yüzey etkisi yine belirgin bir şekilde ayırt edilememektedir [Çizelge 7.19 ve Şekil 7.43 (a-e)].

Çizelge 7.19. Bakır, çelik, cam ve polipropilende %90 bağıl nemde toplanan su miktarları.

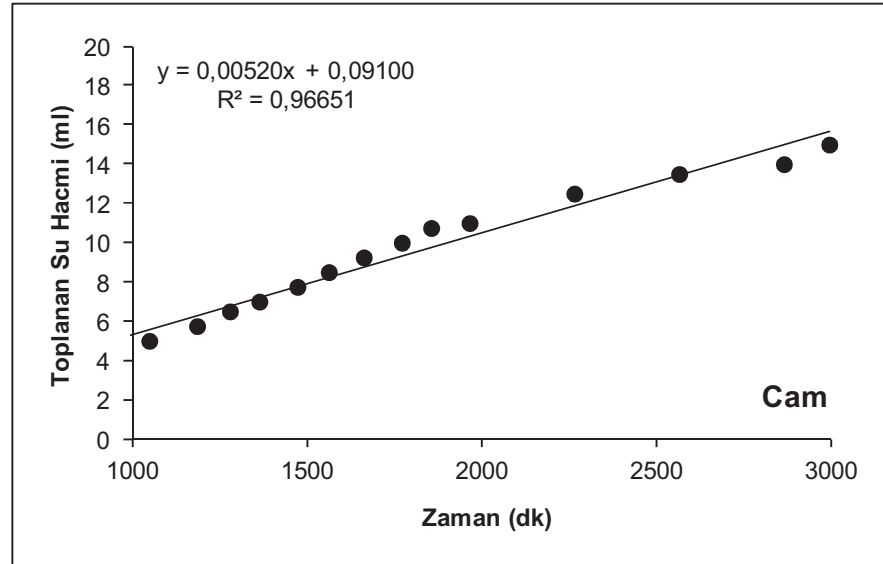
Materyal	$g/m^2 \min$	dV/dt
Bakır Plaka	0,30	0,00694
Çelik Plaka	0,26	0,00648
Cam Lamlar	0,29	0,00520
PP kaplı cam	0,27	0,00665
PP süperhidrofobik	0,34	0,00741



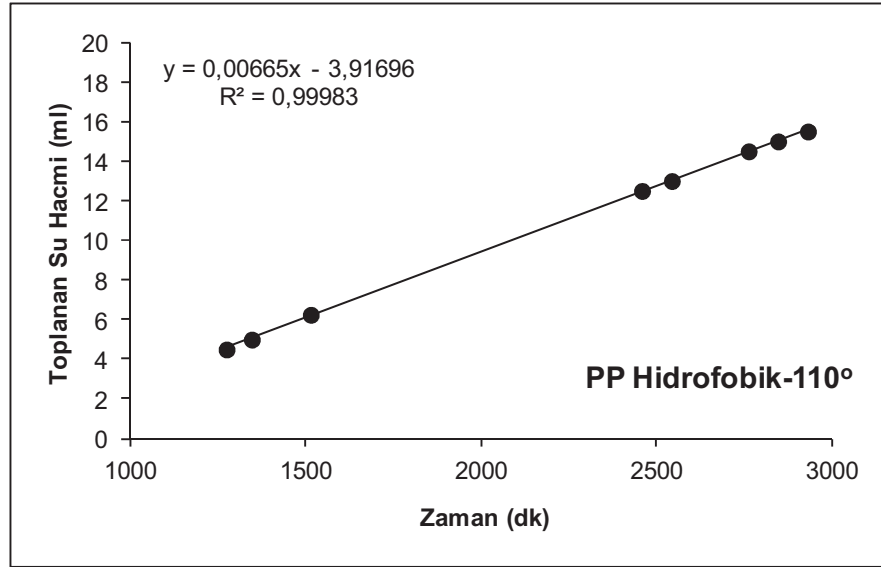
Şekil 7.43. (a)



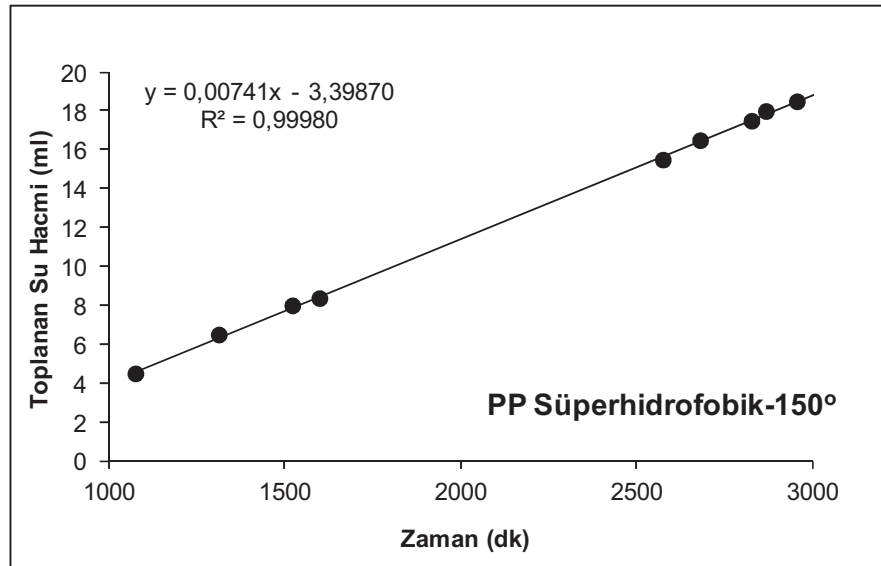
Şekil 7.43. (b)



Şekil 7.43. (c)



Şekil 7.43. (d)



Şekil 7.43. (e)

Şekil 7.43. Bakır sistem üzerine yerleştirilen (a) bakır, (b) çelik, (c) cam, (d), cam üzerine kaplanmış PP, (e) süperhidrofobik PP üzerinde %90 bağıl nemde toplanan su hacminin zamana karşı değişimi.

Bakır hücre kullanılarak gerçekleştirilen bu denemelerden istenilen ayırım görülememekte ve sonuçlardan da katı yüzey etkisi istenilen düzeyde ayırt edilememektedir ancak süperhidrofobik PP yüzeyinde çok daha hızlı kondensasyon gerçekleştiği ve diğer yüzeylere nazaran azda olsa daha yüksek miktarda su toplandığı tespit edilmiştir (Çizelge 7.19, Şekil 7.43 (a-e)). Bunun sebebi literatürde

de açıklandığı gibi [Narhe and Beysens, 2004; Narhe and Beysens, 2006; Jung and Brushan, 2008; Mockenhaupt et al., 2008] süperhidrofobik PP yüzeyde su damlasının tutunmadan akması ve yüzeyde damla birikmesi olmadığından ısı transferine engel bir tabaka meydana gelmediğinden ısı transfer katsayısı çok düşük polipropilen yüzeyde bile bakırdan fazla su toplanmıştır. Buda polimer yüzeylerin damla kondensasyonunda etkin bir şekilde kullanılabilirliğinin bir kanıtıdır.

7.5.2. Peltier Elemanı Kullanılarak Yapılan Su Toplama Denemelerinin Sonuçları

Daha önceki su toplama denemelerinde farklı katı yüzeyler kullanarak birim zamanda bu katı yüzeyler üzerinden toplanan su miktarı tespit edilmeye çalışılmıştı. Ancak elde edilen miktarlar birbirine çok yakın olup kullanılan katı yüzey farkının toplanan suya etkisi gözlenememişti. Hatta bakır, çelik, PP ve cam gibi ısı transfer katsayıları birbirinden farklı materyaller kullanılmasına rağmen hep birbirine yakın miktarlarda su elde edilmişti. Tasarlanan sistemin büyük olması yüzünden koşulların sabitlenmesinde yaşanan güçlükler ve sistemin kanatları arasındaki açının yeterli eğikliğe sahip olmamasının olumsuz etkileri dikkate alınarak yeni bir düzenek tasarlanmasına gidilmiştir. Bu seferki düzenekte soğutma kaynağı olarak bakır hücre yerine Peltier elemanı kullanılmıştır. Peltier elemanı olarak bilinen seramik yüzey, bir doğru akım kaynağına bağlandığında bir yüzeyini ısıtırken, diğer tarafını soğutabilmektedir. Isınan tarafa bir bilgisayar fanı bağlamak suretiyle oluşan ısınmanın önüne geçilmektedir. Denemelerde Peltier elemanına doğru akım kaynağı kullanılarak 4,5 V gerilim ve 1,15 A akım uygulanmıştır. Denemede kullanılan yüzeyler dikey olarak yerleştirilmiş ve bu yüzeyler üzerinde su toplama denemeleri gerçekleştirilmiştir.

7.5.2.1. Peltier Elemanı Kullanılarak Farklı Yüzeyler Üzerinde Yapılan Su Toplama Denemelerinin Sonuçları

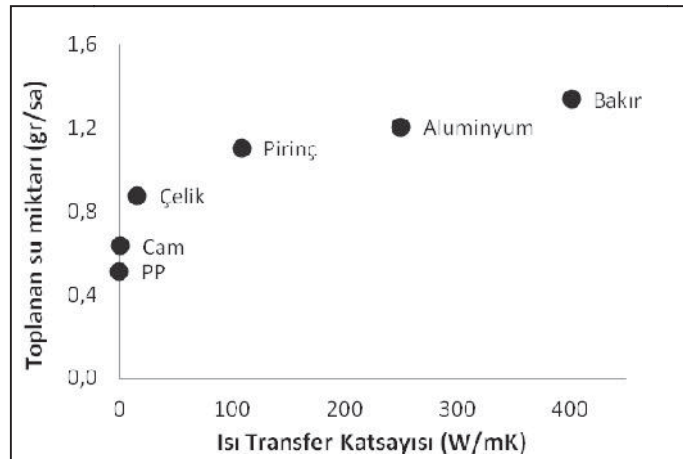
Bu denemelerde, yüzey olarak ısı transfer katsayıları birbirinden farklı bakır, alüminyum, pirinç, paslanmaz çelik, cam ve PP plaka kullanılmış ve $RH: \%92$, $T_{dış}$:

25°C, $T_{yüzey}$: 3°C, $T_{çiğ}$: 23,5°C, ΔT : 22°C, $\Delta T_{çiğ}$: -20,5°C koşullarında çalışılmış olup, elde edilen sonuçlar Çizelge 7.20’de verilmiştir.

Çizelge 7.20. Peltier sistem üzerine yerleştirilen ısı transfer katsayıları farklı çeşitli malzemeler üzerinde %92 bağıl nemde 1 saatte toplanan su miktarları.

Malzeme	Isı transfer katsayısı (W/mK)	Toplanan su miktarı (g/sa)
Bakır	401	1,3371
Alüminyum	250	1,2036
Pirinç	109	1,1007
Paslanmaz	16	0,8749
Cam	1,05	0,6336
PP plaka	0,1	0,5113

Buradan görüldüğü üzere, malzemenin ısı transfer katsayısının artması ile malzeme üzerinde meydana getirilen damla kondensasyonu ile toplanan su miktarı paraleldir ve burada Bakır>Aluminyum>Pirinç>PaslanmazÇelik>Cam>PP sırası vardır. Bu ilişki Şekil 7.44’te de açıkça görülmektedir.



Şekil 7.44. Peltier sistem kullanılarak çeşitli katı yüzeyler üzerinde, %92 bağıl nemde, 1 saatte toplanan su miktarı ile malzemelerin ısı transfer katsayıları arasındaki ilişki.

7.5.2.2. Peltier Elemanı Kullanılarak Bakır, Cam ve PP Üzerine Kaplanmış Tek Polimer (PPPE) Yüzeyler Üzerinde Yapılan Su Toplama Denemelerinin Sonuçları

Bu denemelerde, bakır, cam ve PP yüzeyler üzerine kaplamak için aynı kaplama olarak PPPE polimeri seçilmiştir. Bu yüzeyler üzerine PPPE polimeri kaplanmış ve en üstteki PPPE üzerinde yoğunlaşma denemeleri, Peltier soğutmalı sistemde RH : %92, $T_{dış}$: 25°C, $T_{yüzey}$: 3°C, $T_{çığ}$: 23,5°C, ΔT : 22°C, $\Delta T_{çığ}$: -20,5°C koşullarında gerçekleştirilmiştir. 1 saatte yüzeylerde toplanan su miktarları Çizelge 7.21’de gösterilmektedir. Cam ve PP kaplı PPPE polimeri üzerinden toplanan su miktarları birbirine yakın çıkarken, bakır kaplı PPPE polimeri üzerinde 1 saatte toplanan su miktarı bakırın ısı transfer katsayısı çok yüksek olduğundan diğerlerinin 2 katı civarındadır. Bu da ısı transfer katsayısının yüzey gerilimden daha önemli bir parametre olduğunu göstermektedir.

Çizelge 7.21. Bakır, cam ve PP üzerine kaplı PPPE polimerinin yüzeyinden %92 bağıl nemde toplanan su miktarları.

Malzeme	Alttaki Katının Isı Transfer Katsayısı, k (W/mK)	Toplanan su miktarı (g/sa)
Bakır-PPPE	401	1,3025
Cam-PPPE	1,05	0,6405
PP-PPPE	0,1	0,5384

Bu denemelerde elde edilen sonuçlar, Şekil 7.38 ve 7.40’ta verilen aynı yüzeyler üzerinde %42-43 bağıl nemde çığlenme noktasının 1, 2 ve 3°C altında gerçekleştiren ve kondense olan damlaların büyümelerinin mikroskop altında incelendiği denemelerdeki yüzey kaplama oranı ve hacim artışı ile aynı trendi göstermektedir. O denemeler içinde, ısı transfer katsayısı en yüksek olan bakır üzerine kaplanan PPPE polimeri en yüksek, PP üzerine kaplı PPPE polimeri en düşük yüzey kaplama oranı ve hacim artışı göstermiştir.

7.5.2.3. Peltier Elemanı Kullanılarak Cam ve Bakır Üzerine Kaplanmış Farklı Temas Açısına Sahip Tek Polimer (PP) Yüzeyler Üzerinde Yapılan Su Toplama Denemelerinin Sonuçları

Aynı katı yüzey (cam ve bakır) üzerine kaplanmış farklı temas açısına sahip PP polimerinin üzerinde RH : %92, $T_{dış}$: 25°C, $T_{yüzey}$: 3°C, $T_{çığ}$: 23,5°C, ΔT : 22°C, $\Delta T_{çığ}$: -20,5°C koşullarında gerçekleştirilen su toplama denemelerinin sonuçları ise Çizelge 7.22’de verilmektedir. Bu sonuçlardan da görüldüğü üzere hem cam ve hem de bakır üzerine farklı temas açısı değerlerine sahip PP polimerinin su toplama denemelerinde 155° temas açısı değerine sahip süperhidrofobik PP yüzeyi haricinde diğer yüzeylerde elde edilen su toplama miktarı sonuçları arasında çok büyük farklar gözlenememiştir. Ancak bakır yüzeye kaplı PP polimerler yüzeyleri üzerinden toplanan su miktarları, bakırın ısı transfer katsayısı fazla olduğundan, cam üzerine kaplı PP polimer yüzeylerinin üzerinden toplanan su miktarlarının 2 katı civarındadır.

Çizelge 7.22. Bakır plaka ve cam üzerine kaplanmış farklı temas açısı değerlerine sahip PP polimer yüzeyleri üzerinden %92 bağıl nemde toplanan su miktarları.

θ_e (°)	Cam üzerine kaplı PP (g/sa)	Bakır üzerine kaplı PP (g/sa)
105	0,7227	1,4546
110	0,6964	1,3544
125	0,6975	1,4841
140	-	1,4581
155	0,7761	1,5976

7.5.2.4. Peltier Elemanı Kullanılarak Cam Üzerine Kaplanmış Farklı Polimer Yüzeyler Üzerinde Yapılan Su Toplama Denemelerinin Sonuçları

Aynı malzeme (cam) üzerine kaplanmış farklı polimerlerin üzerinde gerçekleştirilen su toplama denemelerinin sonuçlarının karşılaştırılmasına dair gerçekleştirilen bu çalışmada, cam üzerine farklı polimerler kaplanarak RH : %92, $T_{dış}$: 25°C, $T_{yüzey}$: 3°C, $T_{çığ}$: 23,5°C, ΔT : 22°C, $\Delta T_{çığ}$: -20,5°C koşullarında su toplama denemeleri gerçekleştirilmiş ancak Çizelge 7.23’te verilen sonuçlardan da anlaşıldığı

üzere elde edilen miktarlar arasında büyük farklılıklar gözlenememiştir. Burada kullanılan polimerlerin yüzey gerilimi değerleri birbirinden farklı olmasına rağmen belirgin farklar elde edilememesi, su toplama denemelerinde yüzey özelliklerinin geri planda kaldığını göstermektedir.

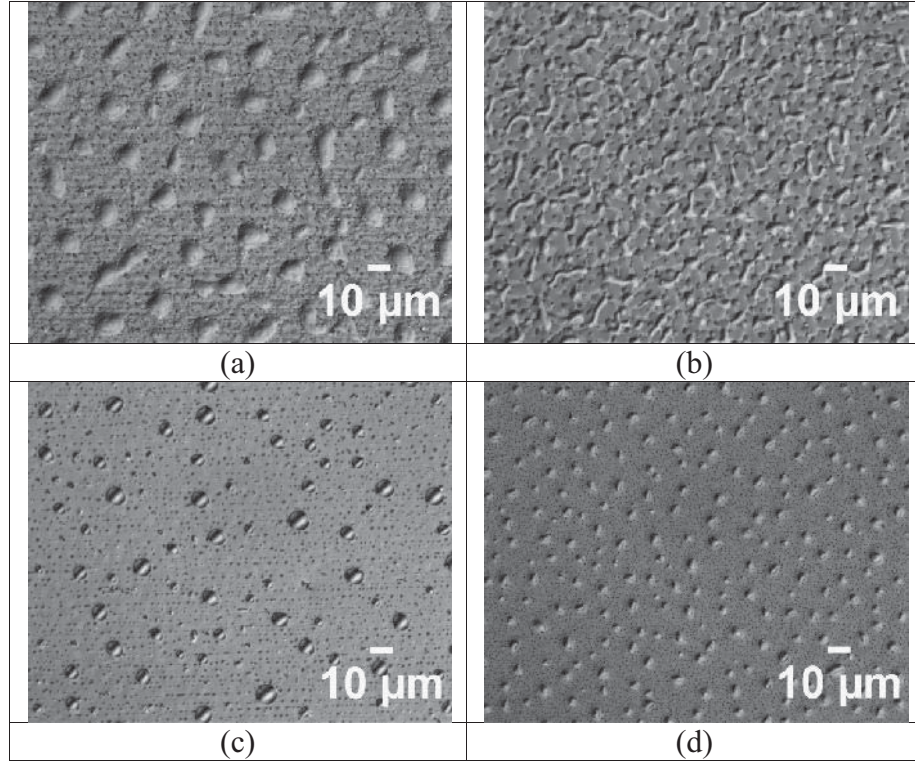
Çizelge 7.23. Cam üzerine kaplanmış farklı polimer yüzeyler üzerinde %92 bağıl nemde toplanan su miktarları.

θ_e (°)	γ^{tot} (mJ/m ²)	Cam üzerine kaplı polimer	Toplanan su (g/sa)
105	28,3	PP	0,7227
110	11,6	Floro Silan	0,6926
105	30,2	PPPE	0,6405
107	33,5	HDPE	0,4119
60	43,3	PVAC	0,5066

Bu çalışmalara ilaveten dört farklı kompozisyonda heterojen etilen-vinil asetat kopolimer karışımı PVAc-EVA blend yüzeyler sentezlenmiş ve sentezlenen bu yüzeylerin üzerinden RH : %92, $T_{dış}$: 25°C, $T_{yüzey}$: 3°C, $T_{çığ}$: 23,5°C, ΔT : 22°C, $\Delta T_{çığ}$: -20,5°C koşullarında toplanan su miktarlarının verimliliği incelenmiştir. Sentezlenen PVAc-EVA yüzeylerin 500x büyültmede çekilen optik mikroskop görüntüleri Şekil 7.45'te, temas açısı ve serbest yüzey enerjisi ölçüm sonuçları Çizelge 7.24'te verilmektedir. Bu yüzeyler üzerinden toplanan su miktarları Çizelge 7.25'te verilmektedir.

Çizelge 7.24. Dört farklı kompozisyonda vinil asetat içeren PVAc-EVA blend yüzeylerin temas açısı ve serbest yüzey enerjisi sonuçları.

VA içeriği	θ_a	θ_e	θ_r	$\Delta\theta$	γ_s^{LW}	γ_s^+	γ_s^-	γ_s^{tot}
53,1 VA	75	73	53	22	34,8	0,0	14,9	34,8
66,5 VA	72	62	51	21	39,1	0,0	23,1	39,1
76,6 VA	71	61	50	21	37,0	0,01	25,2	38,0
86,6 VA	72	61	52	20	37,0	0,0	25,8	37,0



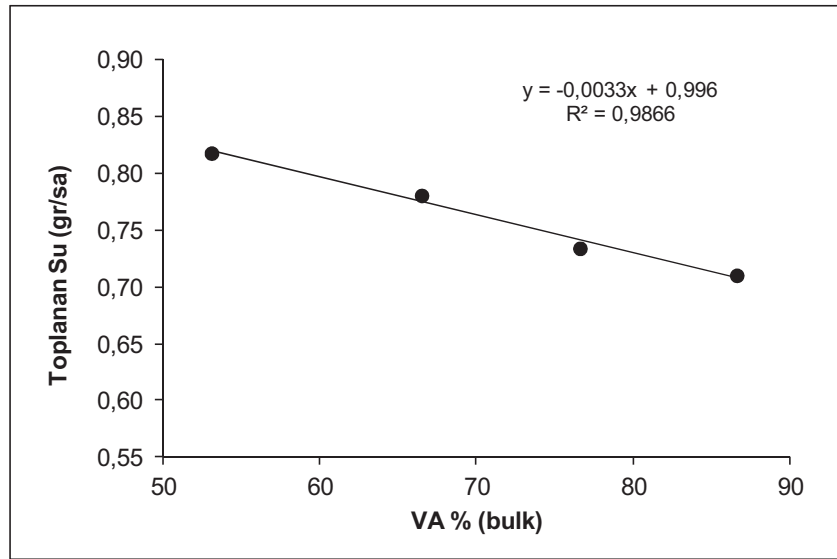
Şekil 7.45. Su toplama denemelerinin gerçekleştirildiği ağırlıkça (a) %53,1, (b) %66,5, (c) %76,6, (d) %86,6 vinil asetat içeren PVAc-EVA yüzeylerin 500x büyültmede çekilmiş optik mikroskop görüntüleri.

Çizelge 7.25. Dört farklı kompozisyonda vinil asetat içeren PVAc-EVA blend yüzeylerde %92 bağıl nemde 1 saatte toplanan su miktarları.

PVAc-EVA blend VA içeriği	Toplanan su miktarı (g/sa)
53,1 VA	0,8178
66,5 VA	0,7806
76,6 VA	0,7340
86,6 VA	0,7103

Deneme sonuçlarından da görüldüğü üzere toplanan su miktarları arasında çok belirgin farklar olmasa da (%53,1 VA içerikli yüzey üzerinde toplanan su miktarı %86,6 VA içerikli yüzeyde toplanan su miktarından %15 fark etmektedir) polimer blendlerdeki vinil asetat miktarı azaldıkça (yani etilen miktarı arttıkça) daha fazla miktarda su toplandığı görülmektedir (Çizelge 7.25). Ayrıca dört farklı kompozisyonda vinil asetat içeren PVAc-EVA blend yüzeylerde %92 bağıl nemde

toplanan su miktarlarının vinil asetat içeriği ile değişimi lineer bir grafik vermektedir (R^2 : 0,99) (Şekil 7.46).



Şekil 7.46. Dört farklı kompozisyonda vinil asetat içeren PVAc-EVA blend yüzeylerde %92 bağıl nemde toplanan su miktarlarının vinil asetat içeriği ile değişimi.

Tüm bu sonuçlardan, uzun süreli kondensasyonun incelendiği bu denemelerde nemli havadan soğuk yüzeye kondense olan su damlalarının açığa çıkardıkları gizli ısıнын yüzeyin ısı transfer katsayısına bağlı olarak yüzey tarafından absorbe edilememesinin önemli olduğu anlaşılmıştır. Bu durum, kondense olan damlaların ısınarak büyümesinin yavaşlamasına ve hatta durmasına neden olmaktadır. Bu da aynı katı malzemeye kaplanan polimerlerin su toplama denemelerinde birbirine yakın sonuçlar vermesine yol açmaktadır. Ancak Peltier elemanı kullanılarak gerçekleştirilen su toplama denemelerinde, ısı transfer katsayıları birbirinden farklı materyaller kullanıldığında bu farkın ortaya koyulabildiği tespit edilmiştir. Su toplama denemelerinde kullanılan materyalin ısı transfer katsayısının bu işte önemli bir etkisinin olduğu, ısı transfer katsayısı yüksek materyaller yüzey olarak kullanıldığında üzerine kaplanan polimer malzeme cinsine bakılmaksızın beklenildiği gibi fazla miktarda su toplandığı sonucuna varılmıştır. Dolayısıyla su toplama denemelerinde polimerin yüzey özelliklerinin arka planda kaldığı, polimerin kaplı olduğu katı yüzeye ait ısı transfer özelliklerinin ve kaplama kalınlığının ön planda olduğu sonucuna varılmıştır.

8. TARTIŞMALAR

8.1. Yüzey Pürüzlülüğünün ve Temas Açısı Karmaşasının Polimer Yüzeylerde Meydana Gelen Damla Kondensasyonunun Hızına Etkisi

Çalışmamızda atmosferik ortamda, çok rastlanan %63 sabit bağıl nem ortamında, çiğlenme sıcaklığının hemen altında, yoğunlaşan damlacıkların ilk oluştuğu (çekirdeklendiği) ve sonrasında su buharının difüzyonuyla büyüdüğü aşamalarda, yüzey pürüzlülüğü, θ , ve CAH gibi yüzey parametrelerinin birim alan başına yoğunlaşan damla sayısı, damlaların toplam hacmi ve yüzeyi kaplama oranı üzerine olan etkisi incelenmiştir.

Kullanılan PP, HDPE, PPPE, LDPE ve EVA yüzeyler üzerinde damla kondensasyonu sonrasında (720. s) elde edilen yüzey kaplama oranı, polimer yüzey pürüzlülüğü ve ayrıca temas açısı karmaşası artışı ile lineer olarak artmaktadır [Şekil 7.10 (b ve d)]. Polimer yüzey pürüzlülüğü ve temas açısı karmaşasına bağlı olan bu ilişki, sadece kondensasyonun sonunda değil, damlaların difüzyonla büyümesinin bütün aşamalarında da lineerliğini korumaktadır. Temas açısı karmaşasının artmasının, kondense olan damlacıkların yüzey kaplama oranını arttırması literatürle uyumludur [Beysens and Knobler, 1986; Beysens, 1991; Beysens, 1995; Zhao and Beysens, 1995]. En pürüzlü yüzey olan PP yüzeyde damlaların yüzey kaplama oranı en yüksekken; düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip EVA yüzeyde ise en düşüktür (Şekil 7.9). Bu sonuçlar çiğlenme sıcaklığının hemen altında yoğunlaşan damlacıklar için, yüzey pürüzlülüğü ve bunu gösteren parametre olan temas açısı karmaşasının, hem damlacıkların ilk oluştuğu (çekirdeklendiği) hem de difüzyonla büyüdüğü aşamalarda önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Çiğlenme sıcaklığının 1°C altında ve daha düşük %35-43 nemde gerçekleştirilen denemelerde de yüzey kaplama oranı, polimer yüzey pürüzlülüğü ve temas açısı karmaşası ile lineer olarak artmaya devam etmektedir [Şekil 7.20, 7.23, 7.26 (b ve c)]. Bu artış hızı kullanılan polimere göre değişmektedir (Şekil 7.19, 7.22 ve 7.25).

Halbuki çiğlenme sıcaklığının 7°C altında ve %46-47 bağıl nemde gerçekleştirilen denemede ise damlacıkların ilk oluştuğu ve difüzyonla büyüdüğü aşamalar kısa sürdüğünden, hızla büyüyen ve birbirine değen damlalar arasında çok sayıda damla birleşmesi meydana geldiğinden, bu koşullarda yüzey pürüzlülüğü ve temas açısı karmaşasının önemi azalmaktadır [Şekil 7.29 (b ve c)]. Bu nedenle kullanılan polimer yüzeyler arasında belirgin bir fark gözlenmemektedir (Şekil 7.28). Literatürde damlaların yüzeyi kaplaması oranı genellikle %40'ın üzerine çıktığında damlalar arasındaki birleşmelerden kaynaklanan farklı bir büyüme hızı rejiminden bahsedilmektedir ve bu aşamadan sonra su toplanmasında, damla birleşmesi prosesi hakimdir. Bu prosesin devamında, damlaların yüzey kaplaması universal limit değer olan %50-55 değerine ulaşır. Biz de %46-47 bağıl nemde ve çiğlenme sıcaklığının 7°C altında gerçekleştirdiğimiz denemede literatürde bahsedilen bu universal değere ulaştığımızı gördük (Şekil 7.28).

Polimer yüzeylere ilk başta kondense olan (çekirdeklenen) su damlacıklarının birim alan başına düşen sayısı (Şekil 7.11) ve toplam sıvı hacmi (Şekil 7.15) yüzey pürüzlülüğü ve temas açısı karmaşası artışı ile artmaktadır. Bu durum literatürde damla kondensasyonunu pürüzlülüğü ve temas açısı karmaşası düşük yüzeylerde difüzyonla damla büyümesinin yanında damla birleşmesi ve belli büyüklüğe ulaşan damlaların uygun bir eğim verilerek yüzeyden ayrılması şeklinde üç aşamayı da bir arada inceleyen çalışmalarda elde edilen sonuçlara ters düşmektedir. Bu çalışmalar, damla kondensasyonu ile ısı transferinin arttırılması temelli olup, temas açısı karmaşasındaki yükselmenin damlanın yüzeyde temas çizgilerinde takılarak yüzeyden ayrılmasını zorlaştırdığı ve damla kondensasyonunu azaltarak ısı transferini düşürdüğünü rapor etmektedir. Bizim çalışmamızda ise bu üç aşamalı damla kondensasyonunun literatürde fazla incelenmeyen ilk aşaması (damla çekirdeklenmesi ve çekirdeklenen damlaların difüzyonla büyümesi) aşaması incelenmiştir. Kullandığımız yüzeyler literatürde rapor edilen yüzeylere nazaran çok daha pürüzlüdür. Bu koşullarda yüzey pürüzlülüğü ve temas açısı karmaşasındaki artışın kondense olan damla sayısını arttırması nedeniyle toplam hacmin arttığı ve temas açısı karmaşasının varlığı damla birleşmesini geciktirdiğinden yüzey kaplama oranının da arttığı tespit edilmiştir. Bir yüzeyin ihtiva ettiği tepeler, çıkıntılar, hatta deformasyonla meydana gelen çizikler bile kondensasyonun meydana gelmesi için gerekli enerji bariyer değerini düşürerek, birer çekirdek oluşum noktası vazifesi

görürler ve kondensasyon meydana geldiğinde damlalar ilk bu noktalarda çekirdeklenerek difüzyonla büyümeye başlarlar [McCormick and Baer, 1965; Patankar, 2010]. Bizim %63 bağıl nemde gerçekleştirdiğimiz çalışmamızda en pürüzlü olan PP yüzey üzerinde birim alan başına kondense olan damla sayısı en yüksektir. Bu pürüzlü PP yüzeyinde kondense olan damlaların difüzyonla büyümeleri sırasında temas çizgisinde tutunarak ortalama temas çaplarında beklenen artışı gösteremediği saptanmıştır (Şekil 7.12). Tersine, EVA ve LDPE gibi düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip olan yüzeylerde ise, temas açısı karmaşası düşük olduğundan, bu yüzeylere kondense olan damlalar temas çizgilerinde daha az takılmaya uğrayarak özgürce büyürken (Şekil 7.12), birim alan başına kondense olan damla sayısı az olduğundan toplam hacim açısından en düşük artışı göstermektedirler (Şekil 7.15). HDPE yüzeyimizin birim alan başına kondense olan damla sayısı ile yüzeye kondense olan damlaların, yüzey kaplama oranı arasındaki ilişkiyi veren semi-ampirik bir denklem olan Vincent eşitliği (Eşitlik 4.6) ile uyumlu sonuç verdiği tespit edilmiştir. Bu da bu eşitliğin orta derecede pürüzlülük içeren yüzeylerde, atmosferik koşullarda çiğlenme sıcaklığının hemen altında gerçekleştirilen damla kondensasyonu için başlangıç anında birim alan başına kondense olan damla sayısı $1000-2000 \text{ mm}^{-2}$ civarında olduğunda uygulanabileceğini göstermektedir (Şekil 7.13).

Bizim çalışmamızda kondense olan damlaların ortalama çapının logaritmasının, zamanın logaritmasıyla değişimini veren grafiklerin eğimleri 0,29-0,38 arasında bulunmuştur (Şekil 7.14). Bu da damlaların ortalama çapının Briscoe ve Galvin'in (1991) çalışmalarında rapor edilen ve kondense olan damlaların damla birleşmesinin ihmal edilebilecek düzeyde olduğu büyüme rejimi olan $[D \propto \text{time}^{1/3}]$ kısmına uygun olarak büyüdüklerini göstermektedir.

8.2. Polimer Yüzeylerde İzole Tek Bir Damlacığın Yarıçapının Büyümesi ile Zaman Arasındaki Üstel İlişki

Damlalar arasında birleşmenin olmadığı veya ihmal edilebilir düzeyde olduğu yüzeylerde difüzyonla büyümesi takip edilen izole bir damlanın yarıçapının zamanın (1/3) kuvvetiyle lineer olarak büyüdüğü literatürde çok sayıda çalışmada

gösterilmiştir. Bizim çalışmamızda, polimer yüzeyler üzerinde seçtiğimiz izole damlaların yarıçapının zamana karşı büyümesini incelediğimiz logaritmik grafiklerin (Şekil 7.30) eğimleri PP, HDPE, PPPE, LDPE ve EVA yüzeyler için sırasıyla 0,13, 0,25, 0,40, 0,32 ve 0,30 olarak elde edilmiştir. Buna göre, bizim çalışmamızda da PP yüzey haricindeki tüm yüzeyler üzerine kondense olan izole damlalar için $(1/3)$ üstel ilişkisi doğrulanmış oldu. PP yüzeyin istisnai davranışı ise, birim alan başına kondense olan damla sayısının fazla olmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü bu damlalar izole damlanın etrafındaki boş alanı kısıtlamakta ve büyümesini yavaşlatmaktadır.

İlaveten başta PP yüzey olmak üzere olmak üzere temas açısı karmaşası yüksek yüzeylere (HDPE ve PPPE için de) kondense olan izole ve etrafı diğer damlalarla sarılı damlalar temas çizgisinde tutunma davranışı sergilemektedirler. Tersine, temas açısı histeresisi düşük LDPE ve EVA yüzeylerde ise damla temas çapı lineer olarak büyümektedir çünkü temas çizgisinde herhangi bir tutunma meydana gelmemektedir (Şekil 7.31). Bu nedenle hacim artışı en yüksek EVA yüzey üzerindeki tek damlalarda elde edilirken, en düşük PP yüzey üzerindeki tek damlalarda elde edilmektedir [Şekil 7.32 (a ve b)].

8.3. Difüzyonla Damla Buharlaşmasında Kullanılan Denklemlerin, Çiğlenme Sıcaklığının Hemen Altında, Tek Bir Damlacığın Yoğunlaşma Hızı için Kullanılması

Su damlası kendi sıcaklığı doygunluk sıcaklığının altında olan bir yüzey üzerine kondense olduğunda ilk olarak havada hali hazırda mevcut bulunan su buharını absorblayarak büyümeye başlar. Kondensasyonun bu kısmı tıpkı damla buharlaşmasında olduğu gibi difüzyon süreci tarafından kontrol edildiğinden, Fick yasasında verilen difüzyon denklemleri ile karakterize edilebilir. Ancak birçok damlacık aynı anda çekirdeklenerek yoğunlaştığından bu işin denel takibi kolay değildir. Sık istiflenmiş damlaların hacimce büyümesi kendilerine komşu damlaların etkisi nedeniyle zamanla doğru orantılı ve lineerdir ($V \sim t$), halbuki diğer damlalardan tam veya kısmen izole edilmiş damlaların hacimlerinin büyümesi ise damla buharlaşmasında olduğu gibi ($V^{2/3} \sim t$) ile orantılı olarak değişmelidir. Literatürde ilk

kez Sokuler ve arkadaşları tarafından silanlanmış çok küçük bir AFM “tip”inin ucunda kondensasyonla meydana gelen çok küçük damlacıkların difüzyonla büyümesinde difüzyon kontrollü damla buharlaşmasında kullanılan denklemlerinin kullanılabilirliği test edilmiş ve bunun mümkün olduğu rapor edilmiştir (ancak teoriden sapmalar rapor edilmemiştir). Biz bu çalışmada, difüzyonla buharlaşma denklemlerinin, polimer yüzeyler üzerinde yoğunlaşan tek bir damlacığın kondensasyonun hızına uygulanabilirliği ilk kez testtik. Bu amaçla %63 sabit bağıl nemde çiğlenme sıcaklığının hemen altında gerçekleştirilen çalışmada polimer yüzeyler üzerine ilk anda kondense olan damlalar arasından diğer damlalardan uzak (izole) ve etrafı komşu damlalarla sık istiflenmiş (sarılı) birer damla seçip difüzyonla büyümelerini takip ettik. Gerek izole ve gerekse etrafı diğer damlalarla sarılı damlaların hacminin $(2/3)$ kuvvetinin zamanla lineer grafikler vermesi [Şekil 7.32 (a ve b)] bize damla buharlaşmasında kullanılan difüzyon denklemlerini çiğlenme sıcaklığının hemen altında kondense olan izole ve etrafı sarılı damlalar için kullanılabileceğini göstermektedir. Difüzyon denklemlerinin teoriden sapma değerleri izole damlalar için %0,17-%2,46 ve sarılı damlalar için %0,06-%2,05 aralığında oldukça düşük olarak tespit edilmiştir (Çizelge 7.14). Ancak burada elde edilen sapmaların küçük olması çiğlenme sıcaklığı hemen altında çalışıyor olmamızdan kaynaklanmaktadır. Çünkü bu koşullarda doygun ortama ait buhar basıncı ile damlanın üzerindeki buhar basıncı arasındaki fark çok küçüktür (izole damlalar için 0,10-0,71 Pa arası, sarılı damlalar için 0,08-0,59 Pa arası) (Çizelge 7.13). Yüzey sıcaklığındaki az bir değişim bile elde edilen ΔP değerlerinde büyük farklar meydana getireceğinden çiğlenme sıcaklığından daha soğuk sıcaklıklarda teoriden daha büyük sapmalar gözlenecektir. Bu çalışmada ilaveten, izole damlacıkların zamanla yoğunlaşma hızların verildiği grafiklerin eğimlerinin $(dV^{2/3}/dt)$, yüzey pürüzlülüğüne bağlı parametreler olan temas açısı ve temas açısı karmaşası artışı ile azalmakta olduğunu tespit edilmiştir [Şekil 7.33 (a ve b)].

8.4. Komşu Damlaların Varlığının Tek Bir Damlacığın Kondensasyon Hızını Azaltması

Öte yandan bu çalışmada, merkezdeki tek bir izole damlanın büyüme hızına, o izole damlanın etrafında, onu saran komşu damlaların varlığının etkisi de

incelenmiştir. Merkez izole damlanın etrafının komşu damlalarla sarıldığında damlanın (dV/dt) kondensasyon hızında meydana gelen düşüşlerin % değeri olarak rapor edildiği Çizelge 7.15 incelendiğinde, kondensasyon hızında %14-40 arasında bir düşüş meydana geldiği gözlemlenmektedir. Doğrudan difüzyonla büyüyen damlalar üzerine ortamda mevcut su buharı, teoriye göre damla çevresinden yani yüzeye paralel yönlerden gelir. Eğer merkezdeki damlanın etrafında paralel yönde gelen su buharıyla kondense olmuş ve sık istiflenmiş çok sayıda damla buluyorsa bunlar merkez damlanın üzerine gelen su buharını absorblayarak merkezdeki damlanın özgürce büyümesine engel teşkil ederler. Kondensasyon hızında meydana gelen düşüşün temel sebebi budur [Beysens, 1995; Beysens, 2006]. Kondensasyon hızındaki bu azalma, daha ziyade yüzey pürüzlülüğü ve dolayısıyla temas açısı ve temas açısı karmaşası yüksek yüzeylerde (PP, HDPE ve PPPE) daha fazladır. Kondensasyon hızındaki düşüşün daha az olduğu yüzeyler ise EVA ve LDPE yüzeylerdir. Bunun nedeni EVA ve LDPE yüzeylere birim alan başına kondense olan damla sayısı az olduğundan bu yüzeylere kondense olan damlalar zaten birer izole damla olarak büyümektedirler ve etrafları sarılı olduğunda dahi bu izole damlaların büyümesi için yeterli alan mevcuttur. Bu nedenle kondensasyon hızında meydana gelen düşüş %18'in altındadır (Çizelge 7.15). Ancak birim alan başına damla sayısı yüksek olan PP, HDPE ve PPPE yüzeylerde kondense olan damlaların etrafında en baştan çok sayıda damlacık olduğundan, merkezdeki damlanın özgürce büyüebilmesi için gerekli alan kısıtlanmaktadır ve bu komşu damlalar merkezdeki damlanın büyümesine baskı yapmaktadır. Etrafı sarılı damlalar söz konusu olduğunda büyüme hızında meydana gelen düşüş Şekil 7.32 (b)'de de görülmektedir. Sonuç olarak merkez damla etrafındaki çok sayıda damla varlığı kondensasyon hızında düşüşe neden olmaktadır.

8.5. Damla Kondensasyonuna Altındaki Malzemenin Isı Transfer Katsayısının Etkisi

Bu tez çalışmasında ayrıca aynı polimer (PPPE) üzerinde meydana gelen damla kondensasyonu hızına alttaki ısı transfer katsayıları birbirinden farklı katı yüzeylerinin etkisi incelenmiş, kondense olan damlaların yüzey kaplama oranı ve kondensasyon hızlarının katı yüzeylerin ısı transfer katsayılarındaki artışla arttığı

tespit edilmiştir (Şekil 7.38 ve 7.40). Bu denemelerde elde edilen sonuçlar aynı yüzeylerin Peltier elemanı kullanılarak gerçekleştirilen su toplama denemelerinde de aynı trendi göstermiştir. Alttaki malzemenin ısı transfer katsayısındaki artışla yüzeyden toplanan su miktarı artmaktadır (Çizelge 7.21).

Son olarak nemi sabitlenmiş ortamlarda, metal ve polimer yüzeyler üzerinde uzun süreli kondensasyonun incelendiği su toplama denemelerinde nemli havadan soğuk yüzeye kondense olan su damlalarının açığa çıkardıkları gizli ısıнын ısı transfer katsayısına bağlı olarak yüzey tarafından absorbe edilememesinin, kondense olan damlaların ısınmasına ve büyümesinin yavaşlamasına, hatta durmasına neden olduğundan aynı katı malzemeye kaplanan polimerlerin su toplama denemelerinde birbirine yakın sonuçlar verdiği tespit edilmiştir (Çizelge 7.22, 7.23 ve 7.25).

9. SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında dört önemli sonuç bulunmuştur:

1. Atmosferik ortamda, %63 sabit bağıl nemde ve çiğlenme sıcaklığının hemen altında, PP, HDPE, PPPE, LDPE ve EVA polimer yüzeylerine kondense olan damlacıkların ilk oluştuğu (çekirdeklendiği) ve sonrasında su buharının difüzyonuyla büyüdüğü aşamalarda, polimer yüzeylerin sahip olduğu yüzey pürüzlülüğü ve buna bağlı parametreler olan θ ve CAH 'daki artışın, birim alan başına kondense olan damlacıkların sayısı, damlacıkların toplam hacmi (su damlacıklarının büyüme hızını) ve yüzey kaplama oranını arttırdığı saptanmıştır. Hangi bağıl nemde çalışılırsa çalışılsın çiğlenme noktasına çok yakın koşullarda incelenen kondensasyonda yüzey pürüzlülüğü ve temas açısı karmaşasının damla kondensasyon hızını etkileyen en önemli parametreler olduğu tespit edilmiştir. Literatürde mevcut çalışmaların büyük çoğunluğunda, damla kondensasyonu önceden soğutulmuş yüzeyler üzerine buhar gönderilerek gerçekleştirildiği için, çalışmamızın gerçek hayata uygun, yani kondensasyonun açık ortamda oluştuğu az sayıda çalışmalardan biri olması ve polimer yüzeyler üzerinde incelenmesi önem taşımaktadır.
2. Polimer yüzeylerde diğer damlalardan izole olarak büyüyen damlaların çapının literatürde rapor edildiği şekilde zamanın (1/3) kuvvetiyle büyüdükleri doğrulanmıştır.
3. Difüzyon kontrollü damla buharlaşması için türetilen denklemlerin, ilk kez polimer yüzeyler üzerinde çiğlenme sıcaklığının hemen altındaki koşullarda tek bir damlacığın yoğunlaşma hızı için başarılı bir şekilde kullanılabildiği gösterilmiştir. İzole damlaların yoğunlaşma hızlarının yüzey pürüzlülüğüne bağlı parametreler olan başlangıç temas açısı ve temas açısı karmaşasının artışı ile azaldığı tespit edilmiştir. Doğada çiğ oluşumu, yüzeyin sıcaklığı çiğlenme sıcaklığına ulaştığında meydana geldiğinden polimer yüzeyler üzerinde çiğ oluşumuna damla buharlaşmasında kullanılan denklemlerin uygulanabilirliğinin

test edilmesi ve kondensasyon hızına yüzey parametrelerin etkisinin incelenmesi bu alanda yapılacak olan çalışmalara katkı sağlayacaktır.

4. Etrafı diğer damlalar tarafından çevrilmiş tek bir damlanın büyüme hızının, diğer damlalardan kısmen izole olarak büyüyen tek bir damlanın büyüme hızından %14-40 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni komşu damlaların yatay buhar difüzyonunu engellemesidir. Bu etki yüzey pürüzlülüğü, θ ve CAH değeri yüksek olan polimer yüzeylerinde daha fazla gözlenmiştir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

1. Aksan, S. N., Rose, J. W., Int. J. Heat and Mass Transfer, 1973, 16, 461-467.
2. Baer, E., McKelvey, J. M., Heat Transfer in Dropwise Condensation, Delaware Science Symposium, University of Delaware, 1958.
3. Bansal, G. D., Khandekar, S., Muralidhar, K., Nanoscale and Microscale Thermophysical Engineering, 2009, 13, 184-201.
4. Barthlott, W., Neinhuis, C., Planta, 1997, 202, 1-8.
5. Baykut, S., Berkem, A., 1975, Fizikokimya, İstanbul Üniversitesi Yayınları, Sayı 2090, No 23, 289-290, İstanbul.
6. Baykut, S., Biran, M., 1986, Yüzey Aktif Maddeler ve Fizikokimyası, İstanbul Üniversitesi Yayınları, Sayı 3385, No 68, 92-93, 109-112, İstanbul.
7. Beysens, D., Knobler, C. M., Phys. Rev. Lett., 1986, 57, 1433-1436.
8. Beysens, D., Steyer, A., Guenoun, P., Fritter, D., Knobler, C. M., Phase Transition, 1991, 31, 219-246.
9. Beysens, D., Atmospheric Res., 1995, 39, 215-237.
10. Beysens, D., C. R. Phys., 2006, 7, 1082-1100.
11. Beysens, D., Muselli, M., Milimouk, I., Ohayon, C., Berkowicz, S. M., Soyeux, E., Mileta, M., Ortega, P., Energy, 2006, 31, 2303-2315.
12. Bindon H. H., 1965, A Critical Review of Tables and Charts used in Psychrometry, Reinhold Publishing, 3-15.
13. Birdi, K. S., Vu, D. T., Winter, A., J. Phys. Chem., 1989, 93, 3102- 3703.
14. Boreyko, J. B., Chen, C. H., Phys. Rev. Lett., 2009, 103, 184501-1-4 .
15. Bourges-Monnier, C., Shanahan, M. E. R., Langmuir, 1995, 11, 2820- 2829.
16. Briscoe, B. J., Galvin, K. P., Phys. Rev. A, 1991, 43, 1906-1917.
17. Briscoe, B. J., Galvin, K. P., Coll. Surf., 1991, 56, 263-278.
18. Briscoe, B. J., Williams, D. R., Galvin, K. P., Coll Surf A: Phys Eng Asp., 2005, 264, 101-105.
19. Cassie, A. B. D., Baxter, S., Trans. Faraday Soc., 1944, 40, 546.
20. Chaudhury, M. K., Owen, M. J., J. Phys. Chem., 1993, 97, 5722-5726.
21. Chen, Y. L., Helm, C. A., Israelachvili, J. N., J. Phys. Chem., 1991, 95, 10736-10747.

22. Chen, C-H., Cai, Q., Tsai, C., Chen, C. L., Xiong, G., Yu, Y., Ren, Z., Appl. Phys. Lett., 2007, 90, 071104-1-3.
23. Chen, C-H., Cai, Q., Chen, C. L. Evaporation and Condensation on Two-Tier Superhydrophobic Surfaces, Proceedings of MNHT2008 Micro/Nano Scale Heat Transfer International Conference, January 6-9, 2008, Tainan, Taiwan.
24. Cussler, E. L., 1997, Diffusion Mass in Fluid Systems, 2nd Ed., Cambridge University Press, Cambridge, p. 1-15.
25. Çengel Y.A., Boles M.A., 1998, Thermodynamics: An Engineering Approach, McGraw- Hill, Third Edition, Ch2, Ch12.
26. Das, A. K., Kilty, H. P., Marto, P. J., Andeen, B. G., Kumar, A., ASME J. Heat Trans., 2000, 122, 278-286.
27. Dettre, R. H., Johnson, R. E., ACS, 1964, 43, 136-144.
28. Doganci, M. D., Cansoy, C. E., Ucar, I. O., Erbil, H. Y., Mielczarski, E., Mielczarski, J. A., J. App. Poly. Sci., 2012, 124, 2100-2109.
29. Dorrer, C., Ruhe, J., Langmuir, 2007, 23, 3820-3824.
30. Dorrer, C., Ruhe, J., Adv. Mater., 2008, 20, 159-163.
31. Dorrer, C., Ruhe, J., Langmuir, 2008, 24, 6154-6158.
32. Drigo A., Alocco G., Pratik Fizik, 1955, İTÜ, 633-639.
33. Erbil, H. Y., Meriç, R. A., J. Phys. Chem. B, 1997, 101, 6867- 6873.
34. Erbil, H. Y., J. Phys. Chem. B, 1998, 102, 9234-9238.
35. Erbil, H. Y., McHale, G., Rowan, S. M., Newton, M. I., Langmuir, 1999, 15, 7378-7385.
36. Erbil, H. Y., McHale, G., Newton, M. I., Langmuir, 2002, 18, 2636-2641.
37. Erbil, H.Y., Demirel, A. L., Avcı, Y., Mert, O., Science, 2003, 299, 1377-1380.
38. Erbil, H. Y., 2006, Surface Chemistry of Solid and Liquid Interfaces, Blackwell Publishing.
39. Erbil, H. Y., Cansoy, C. E., Langmuir 2009, 25(24), 14135-14145.
40. Erbil, H. Y., Adv. Coll. Int. Sci., 2012, 170, 67-86.
41. Erb, R. A., Thelen, E., Dropwise Condensation Characteristics of Permanent Hydrophobic Systems, 1966, U. S. Off. Saline Water Res. Dev. Rep. No: 184.
42. Extrand, C. W., Kumagai, Y., J. Coll. Int. Sci., 1997, 191, 378-383.
43. Fang, X., Li, B., Petersen, E., Ji, Y., Sokolov, J. C., Rafailovich, M. H., J. Phys. Chem. B, 2005, 109, 20554- 20557.
44. Fatica, N., Katz, D. L., Chem. Eng. Progress, 1949, 45, 11, 661-674.

45. Frassy, J., Lecot, C., Delattre, C., Soucemarianadin, A., SHF-Microfluidics: Toulouse, 2006.
46. Fritter, D., Knobler, C. M., Beysens, D. A., Phys. Rev. A, 1991, 43, 2858-2869.
47. Fruta, T., Sakai, M., Isobe, T., Nakajima, A., Langmuir, 2010, 26, 13305-13309.
48. Gao, L., McCarthy, T. J., Langmuir, 2007, 23, 3762.
49. Geankoplis, C. J., 2003, Transport Process and Separation Process Principles, Prentice Hall, Ch 6, 410-428.
50. Good, R. J., 1993, in Contact Angle Wettability and Adhesion, edited by Mittal, K. L. VSP: Utrecht, p 3-36.
51. Good, R. J., J. Am. Chem. Soc., 1952, 74, 5041-5042.
52. Gose, E. E., Mucciardi, A. N., Baer, E., Int. J. Heat Mass Transfer, 1967, 10, 15.
53. Graham, C., Griffith, P., Int. J. Heat Mass Transfer, 1973, 16, 337-346.
54. Griffith, P., Lee, M. S., Int. J. Heat Mass Transfer, 1967, 10, 697-707.
55. Haraguchi, T., Shimada, R., Kumagai, S., Takeyama, T., Int. J. Heat Mass Transfer, 1991, 34, 3047-3054.
56. Hartnett J. P., Irvine T., 1991, Advances in Heat Transfer, 21, Academic Press, 55-133.
57. Holden, K. M., Wanniarachchi, A. S., Marto, P. J., Boone, D. H., Rose, J. W., J. Heat Transfer, 1987, 109, 768-774.
58. Jakob, M., Mechanical Engineering, 1936, 58, 729-739.
59. Jung, Y. C., Brushan, B., Journal of Microscopy, 2008, 229, 127-140.
60. Kandlikar, S. G., 1999, Handbook and Phase Change Boiling and Condensation, Ch 20, pp. 581-592.
61. Kim, J.-H., Ahn, S. II, Kim, J. H., Zin, W-C., Langmuir, 2007, 23, 6163- 6169.
62. Kumar, A., Whitesides, G. M., Science, 1994, 263, 60-62.
63. Lan, Z., Ma, X., Zhou, X., Wang, M. J. Enhanced Heat Transfer, 2009, 16, 61-71.
64. Lan, Z., Ma, X., Wang, S., Wang, M., Li, X., Chem. Eng. J., 2010, 156, 546-552.
65. Le Fevre, E. J., Rose, J. W., A theory of heat transfer by dropwise condensation, Proc. of 3rd International Heat Transfer Conference, 1966, 2, 362-375.
66. Leach, R. N., Stevens, F., Langford, S. C., Dickinson, J. T., Langmuir, 2006, 22, 8864-8872.

67. Lopez, G.P., Biebuyck, H. A., Frisbie, C. D., Whitesides, G. M., *Science*, 1993, 260, 647-649.
68. Ma, X. H., *Dropwise Condensation on PTFE Coated Surfaces and the Catastrophe Transition Mechanisms between Dropwise and Film Condensation*, Ph.D. Thesis, Dalian University of Technology, 1994.
69. Ma, X., Rose, J. W., Xu, D., Lin, J., Wang, B., *Chem. Eng. J.*, 2000, 78, 87-93.
70. Ma, X., Chen, J., Xu, D., Lin, J., Ren, C., Long, Z., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 2002, 45, 3405-3411.
71. Maa, J. R., *Chem. Eng. J.*, 1978, 16, 171-176.
72. Marto, P. J., Looney, D. L., Rose, J. W., Wanniarachchi, A. S., *Int. J. Heat Mass Transfer*, 1986, 29, 1109-1117.
73. McCormick, J. L., Baer, E., *Journal of Colloid Science*, 1963, 18, 208-216.
74. McCormick, J. L., Baer, E., 1965, *Dropwise Condensation on Horizontal Surfaces*, *Developments in Mechanics*, Pergamon Press, N. Y., pp. 749-775.
75. McCormick, J. L., Westwater J. W., *Chem. Eng. Sci.*, 1965, 20, 1021-1036.
76. McHale, G., Rowan, S. M., Newton, M. I. Banerjee, M. K., *J. Phys. Chem. B*, 1998, 102, 1964-1967.
77. McHale, G., Aqil, S., Shirtcliffe, N. J., Newton, M. I., Erbil, H. Y., *Langmuir*, 2005, 21, 11053-11060.
78. Meakin, P., *Rep. Prog. Phys.*, 1992, 55, 157-240.
79. Meric, R. A., Erbil, H. Y., *Langmuir*, 1998, 14, 1915-1920.
80. Mikic, B. B., Hannemann, R. J., *J. Heat and Mass Transfer*, 1976, 19, 1309-1317.
81. Mockenhaupt, B., Ensikat, H. J., Spaeth, M., Barthlott, W., *Langmuir*, 2008, 24, 13591-13597.
82. Motornov, M., Minko, S., Nitschke, M., Grundke, K., Stamm, M., *Polymer Preprints*, 2002, 43 (2), 379-380.
83. Narhe, R. D., Beysens, D. A., *Physical Review Letters*, 2004, 93, 076103-1-4.
84. Narhe, R. D., Beysens, D. A., *Langmuir*, 2007, 23, 6486-6489.
85. Narhe, R. D., Beysens, D. A., *Europhys. Lett.*, 2006, 75, 98-104.
86. Narhe, R. D., Khandkar, M. D, Shelke, P. B., Limaye, A. V., Beysens, D. A., *Physical Review E*, 2009, 80, 031604-1-5.

87. Neumann, A. W., Abdelmessih, A. H., Hameed, A., Int. J. Heat Mass Transfer, 1978, 21, 947-953.
88. Nusselt, W., Z Vereines Deutsch Ing, 1916, 60, 541-546, 569-575.
89. Onda, T., Shibuichi, N., Satoh, N., Tsuji, K., Langmuir, 1996, 12 (9), 2125-2127.
90. Oner, D., McCarthy, T. J., Langmuir, 2000, 16, 7777.
91. Owens, D. K., Wendt, R. C., J Appl Polym Sci., 1969, 13, 1741.
92. Panwar, A. K., Barthwal, S. K., Ray, S., J. Adhesion Sci. Technol., 2003, 17, 1321-1329.
93. Parker, A. R., Lawrence, C. R., Nature, 2001, 414, 33-34.
94. Patankar, N. A., Langmuir, 2003, 19, 1249.
95. Patankar, N. A., Soft Matter, 2010, 6, 1613-1620.
96. Picknett, R. G., Bexon, R., 1977, 61, 336-350.
97. Pocheron, F., Monson, P. A., Langmuir, 2006, 22, 1595-1601.
98. Ponter, A. B., Adv. Coll. Int. Sci., 1992, 39, 383-395.
99. Rausch, M. H., Fröba, A. P., Leipertz, A., Int. J. Heat Mass Transfer, 2008, 51, 1061-1070.
100. Rose, J. W., Glicksman, L. R., Int. J. Heat Mass Transfer, 1973, 11, 411-425.
101. Rose, J. W., J. Proc. Instn. Mech. Engrs., 2002, 216, 115-128.
102. Rose, J. W., Chem. Eng. Res. Design, 2004, 82 A4, 419-429.
103. Rowan, S. M., Newton, M. I., McHale, G., 1995, 99, 13268- 13271.
104. Sadhal, S. S., Plesset, M. S., Transactions of the ASME Journal of Heat Transfer, 1979, 101, 48-54.
105. Schafle, C., Leiderer, P., Bechinger, C., Europhysics Letters, 2003, 63, 394-400.
106. Schmidt, E., Schurig, W., Sellschop, W., Versuche uber die condensation von wasserdampf in film-und tropenform, Tech. Mech. Thermodyn. (Forsch. Ing. Wes.), 1, 53-63, 1930.
107. Sikarwar, B. S., Battoo, N. K., Khandekar, S., Muralidhar, K., J. Heat Transfer-Transactions of the ASME, 2011, 133, 021501-1-15.
108. Sokuler, M., Auernhammer, G. K., Liu, C. J., Bonacurro, E., Butt, H-J, EPL, 2010, 89, 36004-p1-6.
109. Steyer, A., Guenoun, P.; Beysens, D.; Knobler, C. M., Physical Review A, 1991, 44, 8271-8277.
110. Stylianou, S. A., Rose, J. W., J. Heat Transfer, 1980, 102, 477-482.

111. Tanaka, H., Trans. ASME, Journal of Heat Transfer, 1975, 97, 341-346.
112. Tanaka, H., Trans. ASME, Journal of Heat Transfer, 1979, 101, 603-611.
113. Tanner, D. W., Pope, D., Potter, C. J., West, D., Int. J. Heat Mass Transfer, 1965, 8, 419-426.
114. Tanner, D. W., Pope, D., Potter, C. J., West, D., Int. J. Heat Mass Transfer, 1965, 8, 427-436.
115. Tammann, G., Boehme, W., Annalen der Physik, 1935, 5, 77-80.
116. Tasanawa, I., Tachibana, F., A Synthesis of the Total Process of Dropwise Condensation using the Method of Computer Simulation, Proc. Fourth Int. Heat Transfer Conference 6, 1970.
117. Tasanawa, I., 1991, Advances in Condensation Heat Transfer, vol 21, p. 55-139.
118. Tsuruta, T., Tanaka, H., Togashi, S., Int. J. Heat and Mass Transfer, 1991, 34, 2787-2796.
119. Ucar, I. O., Cansoy, C. E., Erbil, H.Y., Pettitt, M. E., Callow, M. E., Callow, J. A., Biointerphases, 2010, 5, 75-84.
120. Ucar, I. O., Doganci, M. D., Cansoy, C. E., Erbil, H. Y., Avramova, I., Suzer, S., Appl. Surf. Sci., 2011, 257, 9587-9594.
121. Umur, A., Griffith, P., Trans. ASME, Journal of Heat Transfer, 1965, 87C, 275-282.
122. van Oss, C. J., Chaudhury, M. K., Good, R. J., Chem. Rev., 1988, 88, 927-941.
123. van Oss, C. J., Good, R. J., Langmuir 1992, 8, 2877.
124. Varanasi, K. K., Hsu, M., Bhate, N., Yang, W., Deng, T., Appl. Phys. Lett., 2009, 95, 094101-1-3.
125. Vargas, W. E., Lushiku, E. M., Niklason, G. A., Nilsson, T. M., J. Solar Energy Materials & Solar Cells, 1998, 54, 343-350.
126. Vemuri, S., Experimental and Theoretical Studies on Non-filmwise Condensation Techniques for Enhancing Heat Transfer in the Process of Steam Condensation, PhD Thesis, University of Nevada, Reno, 2005.
127. Vincent, R., Proc. R. Soc., London, Ser. A, 1971, 321, 53-68.
128. Welch, J. F., Westwater, J. W., Microscopic Study of Dropwise Condensation, International Heat Transfer Conference, Colorado, USA, p. 302, 1961.
129. Wenzel, R. N., Industrial and Engineering Chemistry, 1936, 28, 98.
130. Wenzel, H., Linde-Ber. Tech. Wiss., 1964, 18, 44.
131. Wier, K. A., McCarty, T. J., Langmuir, 2006, 22, 2433-2436.

132. Wilkins, D. G., Bromley, L. A., Chem. Eng. J., 1973, 19, 839-845.
133. Winston P. W., Bates, D. H., Ecology, 1960, 41, 232- 237.
134. Woodruff, D. W., Westwater, J. W., Int. J. Heat Mass Trans., 1979, 22, 629-632.
135. Woodruff, D. W., Westwater, J. W., ASME J Heat Transfer, 1981, 103, 685-692.
136. Wu, H., Maa, J. R., Chem. Eng. J., 1976, 12, 225-231.
137. Wu, Y. T., Yang, C. X., Yuan, X. G., Numerical Heat Transfer, Part A, 2001, 40, 169-179.
138. Yin, L., Wang, Y., Ding, J., Wang, Q., Chen, Q., App. Surf. Sci., 2012, 258, 4063-4068.
139. Young, T., 1805, Phil. Trans. R. Soc. Lond., 95, 65-87.
140. Yüncü, H., Kakaç, S., 1999, Temel Isı Transferi, 1-3, Bilim Kitapevi, Ankara,
141. Zhai, L., Berg, M. C., Cebeci, F. C., Kim, Y., Milwid, J. M., Cohen, R. E., Rubner, M. F., Nano Letters, 2006, 6, 1213-1217.
142. Zhao, H., Beysens, D., Langmuir, 1995, 11, 627-634.
143. Zheng, Y., Bai, H., Huang, Z., Tian, X., Nie, F. Q., Zhao, Y., Zhai, J., Jiang, L., Nature, 2010, 463, 640-643.

ÖZGEÇMİŞ

İkrime ORKAN UÇAR, 1981 yılında İzmit’te doğdu. İlköğrenimini Kavaklı İlköğretim Okulunda, orta öğrenimini Gölcük İlköğretim Okulunda ve lise öğrenimini İhsaniye Yabancı Dil Ağırlıklı Lisesi’nde tamamladı. 1999 yılında başladığı Kocaeli Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümü’ndeki lisans eğitimini 2003 yılında bölüm ikincisi olarak tamamlayarak, aynı yıl Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisans eğitimine başladı ve 2006 yılında yüksek lisans eğitimini tamamladı. Aynı yıl Eylül ayında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü’nde doktora eğitimine ve Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı ve halen bu görevini sürdürmektedir.

YAYIN LİSTESİ:

(A) SCI Tarafından Taranan Uluslararası Dergilerdeki Yayınları:

Doktora Tezi Kapsamında Yapılan Yayınlar:

1. **İkrime O. Ucar**, H. Y. Erbil, “Dropwise Condensation Rate of Water Breath Figures on Polymer Surfaces having Similar Surface Free Energies” Applied Surface Science, yayına gönderildi (revizyonda), Nisan 2012.
2. **İkrime O. Ucar**, H. Y. Erbil, "Use of Diffusion Controlled Drop Evaporation Equations for Dropwise Condensation during Dew Formation and Effect of Neighboring Droplets and Effect of Neighboring Droplets" Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, yayına gönderildi (revizyonda), Mayıs 2012.
3. **İkrime O. Ucar**, Merve D Doganci, C. Elif Cansoy, H.Y. Erbil, Iva Avramova, Sefik Suzer "Combined XPS and Contact Angle Studies of Ethylene Vinyl Acetate and Polyvinyl Acetate Blends" Applied Surface Science, 2011, 257, 9587-9594.
4. **I. O. Ucar**, C. E. Cansoy, H. Y. Erbil, M. E. Pettitt, M. E. Callow, J. A. Callow, “Effect of Contact Angle Hysteresis on the Removal of the Sporelings of the Green Alga *Ulva* from the Fouling-Release Coatings Synthesized from Polyolefin Polymers” Biointerphases 2010, 5 (3), 75-84.

Diğer Yayınlar:

1. A. Kibar, H. Karabay, K. S. Yiğit, **I. O. Ucar**, H. Y. Erbil, “Experimental Investigation of Inclined Liquid Water Jet Flow onto Vertically Located Superhydrophobic Surfaces, Experiments in Fluids, 2010, 49 (5), 1135-1145.
2. M. Dandan, C. E. Cansoy, **I. O. Ucar**, H.Y.Erbil, E. Mielczarski, J.A.Mielczarski, “Combined XPS and Contact Angle Studies of Flat and Rough Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer Films” Journal of Applied Polymer Science, 2012, 124 (3), 2100-2109.

(B) Uluslararası Konferanslardaki Tebliğleri:

1. Characterization of Superhydrophobic Polypropylene Surface Prepared from Polypropylene Particles as a Monolayer, **I. Orkan**, H. Y. Erbil, European Union, COST Chemistry Action D19, Chemical Functionality Specific to the Nanometer Scale, Nano-Chemistry Workshop, Koc University, 1-4 September 2005, Istanbul, Turkey.
2. Superhydrophobic Surface Formation by using Polypropylene Particle Monolayer, **I. Orkan**, H. Y. Erbil, European Union, COST Chemistry Action D19, Chemical Functionality Specific to the Nanometer Scale, NanoChemistry Workshop, 12-16 May 2006, Sitges, Barcelona, Spain.
3. Novel Non-biocidal Hydrophobic Antifouling Coatings, H. Y. Erbil, C. E. Ozen, **I. Orkan**, E. Doganci, M. Dandan and C. Hamamci, 13 th International Congress on Marine Corrosion and Biofouling, 23-28 July 2006, Rio de Janeiro, Brazil.
4. Surface Characterization and Antifouling Effects of Large Area Micropatterned EVA-PP Blend Coatings, **I. O. Ucar**, C. E. Cansoy, H. Y. Erbil, 3rd Joint ONR / AMBIO Workshop on Marine Adhesion and Antifouling: Concepts and Issues, 10-12 December 2007, Sedona, Arizona, USA.
5. Fabrication of Large Area Micro-patterned Polyolefin Blend Coatings Having Foul Release Properties, H. Y. Erbil, N. A. Gengec, **I. O. Ucar**, M. Dandan, C. E. Cansoy, 14th International Congress on Marine Corrosion and Fouling, 27-31 July 2008, Kobe, Japan.

6. Heterogeneous Surface Coatings: Water Contact Angle and Wetting Hysteresis Relation with the Foul-Release Properties of Marine Organisms, H. Y. Erbil, **I. O. Ucar**, C. E. Cansoy, N. A. Gengec, M. Dandan, U. Cengiz, 13th IACIS International Conference on Surface and Colloid Science and the 83rd ACS Colloid and Surface Science Symposium, 14-19 June 2009, New York, USA.
7. XPS Analysis and Contact Angle Characterization of Ethylene-Vinyl Acetate Copolymer Blends with Polyethylene and Polyvinyl Acetate, **I. O. Ucar**, M. Dandan, C. E. Cansoy, H. Y. Erbil, I. Avramova, S. Suzer, 13th European Conference on Applications of Surface and Interface Analysis (ECASIA'09), 18-23 October 2009, Antalya, Turkey.
8. Volume and Surface Area Increase of Microscopic Water Droplets on Polymer Surfaces with Drop-Wise Condensation, **I. O. Ucar** and H. Y. Erbil, Mini Workshop on Surface Science for Inauguration of the Turkish Surface Science Society (TuSSS), 23 May 2011, Bilkent University, Ankara, Turkey.
9. Contact Angle Hysteresis-Surface Coverage Relation by Drop-Wise Condensation, **I. O. Ucar** and H. Y. Erbil, 7th Nanoscience and Nanotechnology Conference (NANOTR-VII), 27 June-01 July 2011, Sabancı University, Istanbul, Turkey.

(C) Ulusal Konferanslardaki Tebliğleri:

1. Polipropilen Partiküllerin Mono-tabaka Olarak Kaplanmasıyla Oluşan Süperhidrofob Yüzeyin Karakterizasyonu, **İ. Orkan**, H. Y. Erbil, XIX. Ulusal Kimya Kongresi, 30 Eylül-4 Ekim 2005, Ege Üniversitesi, Kuşadası, İzmir.
2. Langmuir Blodgett Tekniği ile Polipropilen Partiküllerin Monotabaka Olarak Kaplanması ve Oluşan Süperhidrofobik Yüzeyin Karakterizasyonu, **İ. Orkan**, H. Y. ERBİL. VII. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, 5-8 Eylül 2006, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
3. İç Cidarı Islanmaz Malzeme ile Kaplı Dairesel Bir Boru İçinden Geçen Suyun Laminer Bölgedeki Basınç Düşümünün Teorik ve Deneysel İncelenmesi, A. Kibar, K. S. Yiğit, H. Karabay, H. Y. Erbil, **İ. O. Uçar**, IV. Ege Enerji Sempozyumu, 21-23 Mayıs 2008, Ege Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü, Bornova, İzmir.

4. Mikrodeseanlı Etilen Vinil Asetat-Polipropilen Karışımı Geniş Kaplamaların Sentezi ve Yüzey Karakterizasyonu, **İ. O. Uçar**, C. E. Cansoy, H.Y. Erbil, VIII. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi, 26-29 Ağustos 2008, İnönü Üniversitesi, Malatya.
5. Polipropilen (PP), Polipropilen-Polietilen (PP-PE), Yüksek Yoğunluklu Polietilen (HDPE), Polimerleriyle Siklik Olefin Kopolimer (COC) Karışımlarından Yüzey Pürüzlülüğünün Kontrolü ve Karakterizasyonu, N. A. Gengeç, **İ. O. Uçar**, N. S. Kocabaş, H. Y. Erbil, 22. Ulusal Kimya Kongresi, 6-10 Ekim 2008, Doğu Akdeniz Üniversitesi, Kıbrıs.
6. Bazı Heterojen Poliolefin Yüzeylere Deniz Yosunu Oluşturan Ulva Sporların Yapışmasının İncelenmesi, **İ. O. Uçar**, C. E. Cansoy, H. Y. Erbil, 3. Ulusal Polimer Bilim ve Teknoloji Kongresi ve Sergisi, 12-14 Mayıs 2010, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
7. Polimer Üzerindeki Su Temas Açısının Su Damlası Yoğunlaşması Üzerine Etkisi, N. Tüccar, **İ. O. Uçar**, H. Y. Erbil, 3. Ulusal Polimer Bilim ve Teknoloji Kongresi ve Sergisi, 12-14 Mayıs 2010, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli.
8. Heterojen Etilen-Vinil Asetat Kopolimer Karışımı Yüzeylerin Karakterizasyonu, **İ. O. Uçar**, M. D. Doğancı, C. E. Cansoy, H. Y. Erbil, I. Avramova, Ş. Suzer, 24. Ulusal Kimya Kongresi, 29 Haziran - 2 Temmuz 2010, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Zonguldak.
9. Denizlerdeki Biyolojik Kirliliği Önlemek Amacıyla Geliştirilen Poliolefin Kaplamalar ile Ulva Sporlarının Yüzeylerden Uzaklaştırılması Arasındaki İlişki, **İ. O. Uçar**, C. E. Cansoy, H. Y. Erbil, 15. Ulusal Sıvı Hal Fiziği Sempozyumu, 24-26 Kasım 2011, Pirireis Üniversitesi, İstanbul.
10. Polimer Yüzeylerde Oluşan Su Damlası Yoğunlaşmasını Etkileyen Özellikler, **İ. O. Uçar**, H. Y. Erbil, 10. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi (UKMK-10), 3-6 Eylül 2012, Koç Üniversitesi, İstanbul (Sözlü Sunum olarak kabul edildi).
11. Tek Damla Yoğunlaşmasında Kullanılan Difüzyon Eşitliklerinin, Tek Damla Yoğulaşmasında Kullanılabilirliğinin Test Edilmesi, **İ. O. Uçar**, H. Y. Erbil, 10. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi (UKMK-10), 3-6 Eylül 2012, Koç Üniversitesi, İstanbul (Sözlü Sunum olarak kabul edildi).

(D) Diğer Yayınlar:

1. H. Yıldırım ERBİL, İkrime ORKAN UÇAR, "Kir Tutmayan Yüzeyler" Bilim ve Teknik, Şubat 2010, 50-57.

