

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

**NEMLİ ORTAMLARDA SU DAMLASININ
KOLAY YOĞUNLAŞTIĞI YÜZEYLERİN
İNCELENMESİ**

**NİLAY TÜCCAR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI**

**GEBZE
2010**

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

NEMLİ ORTAMLARDA SU DAMLASININ
KOLAY YOĞUNLAŞTIĞI YÜZEYLERİN
İNCELENMESİ

NİLAY TÜCCAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ
ANA BİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI

Prof. Dr. H.Yıldırım ERBİL

GEBZE

2010



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 14.06.2010 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Nilay TÜCCAR'ın tez çalışması Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

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

ÜYE

: Prof. Dr. Mahmut BAYRAMOĞLU

ÜYE

: Doç. Dr. Erhan DEMİRBAŞ

ONAY

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

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZ BAŞLIĞI: NEMLİ ORTAMLARDA SU DAMLASININ KOLAY YOĞUNLAŞTIĞI YÜZEYLERİN İNCELENMESİ

YAZAR ADI: NİLAY TÜCCAR

Yoğunlaşma, su buharının, ortamda bulunan ve doygunluk sıcaklığından daha düşük sıcaklıktaki bir yüzey üzerinde, sıvı haline dönüştüğü bir faz değişim olayıdır. Katı yüzeyler üzerinde yoğunlaşan sıvı damlacıklar halinde ise “*damla yoğunlaşması*” adı verilmektedir ve ısı aktarımını arttırdığından daha avantajlıdır. Yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranı, sıvının kapladığı toplam yüzey alanının, o katının toplam alanına oranıdır ve katının yüzey özelliklerine bağlıdır. Buharlaşma, doğadaki temel olaydan biridir. Damla buharlaşması, püskürtmeli yazıcılar, tarımsal ilaçlama gibi birçok endüstriyel işlemlerde kullanılmaktadır. Düz yüzeyler üzerinde damlaların difüzyonla buharlaşma mekanizması iyi bilinmemekte, desenli süperhidrofob yüzeyler üzerinde desen geometrisi farklılığının, buharlaşma hızına etkisi az incelenmiştir. Ayrıca, havadaki su buharının küçük bir damla üzerinde yoğunlaşarak bu su damlasını büyütmesinin, literatürdeki difüzyon denklemleri ile açıklanması pek az çalışılmıştır.

Bu tez çalışması 3 bölümden oluşmaktadır: İlk bölümde, mikro desenli süperhidrofob yüzeyler üzerinde su damlasının buharlaşması takip edilerek desen geometrisi farklılığının buharlaşma hızına etkisi sabit bağıl nem koşullarındaki pleksiglass hücrede incelendi. Buharlaşma hızı desen çapının artışı ile azalırken iki desen arasındaki mesafe/desen çapı oranının artışı ile arttı. İkinci kısımda, polimer yüzeylerde yoğunlaşma gerçekleştirilerek yüzey özelliklerinin yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranına etkisi araştırıldı. Yüzey kaplama oranına, temas açısı ve temas açısı histeresis azaltıcı, serbest yüzey enerjisi ise arttırıcı etki gösterdi. Üçüncü kısımda, Teflon FEP100 yüzeyi üzerinde oluşturulan su damlasının 90% bağıl nemde yoğunlaşma sırasında büyümesi takip edilerek difüzyon denklemleri ile uyumluluğu incelendi. Katı varlığına dayanan $f(\theta)$ etkisi hesaba katıldığında, büyüme difüzyon denklemlerine daha uyumludur.

SUMMARY

TITLE OF THE THESIS: INVESTIGATION OF SURFACES WHERE WATER DROP CONDENSES EASILY IN HUMID CONDITIONS

AUTHOR: NILAY TUCCAR

Condensation is a phase change process of water vapor to liquid on a solid surface in the environment that has a temperature below saturation temperature. If the condensate on solid surfaces are in form of droplets, called “*dropwise condensation*” and more advantageous to increase heat transfer. Surface coverage ratio of condensate is the ratio of total surface area covered by droplets to solid’s total area and depends on solid’s surface properties. Evaporation is a fundamental phenomenon in nature. Drop evaporation is used in many industrial processes as inkjet printers, pesticide spray etc. Evaporation of droplets with diffusion mechanism on flat surfaces is well known however pattern geometry difference effect to the evaporation rate on patterned superhydrophob surfaces was studied very limited. Furthermore, the explanation of condensed droplet growth with diffusion equations has been worked very few in the literature.

This thesis consists of 3 parts: In first part, water drop evaporation on micro patterned superhydrophob surfaces was followed and effect of pattern geometry difference to the evaporation rate was examined at constant relative humidity conditions in a plexyglass chamber. Evaporation rate decreased with pattern diameter increase, increased with the ratio of distance between two patterns to pattern diameter increase. In second part, effect of surface properties to the surface coverage ratio was investigated during condensation on polymer surfaces. Contact angle, contact angle hysteresis implied a decreasing effect; surface free energy implied an increasing effect on condensate’s surface coverage ratio. In third part, water drop growth during condensation on a Teflon FEP100 surface at 90% relative humidity, was followed and was described by using diffusion equations. When $f(\theta)$ parameter was considered drop growth was much more compatible with diffusion equations.

TEŞEKKÜR

Tüm yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve tecrübesini hiçbir zaman esirgemeyen, gerek bilime gerekse hayata karşı düşünceleri ile örnek olan ve ışık tutan sayın hocam Prof. Dr. H.Yıldırım ERBİL' e,

Bugüne kadar zorluklara karşı yılmadan mücadeleyi öğreten, her zaman doğruluğu savunucu ve özverili davranışlarını örnek aldığım, her konuda yanımda olan babam Mehmet TÜCCAR ve annem Ayşe TÜCCAR' a, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ablam Nilüfer TÜCCAR BALLI ve kardeşim M. Can TÜCCAR' a,

Tez çalışmam süresince bilgilerini ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen arkadaşlarım Arş. Grv. Merve DANDAN DOĞANCI, Arş. Grv. İkrime ORKAN UÇAR'a,

Çalışma arkadaşlarım Salih ÖZBAY, Arş. Grv. Uğur CENGİZ, Arş. Grv. C.Elif ÖZEN CANSOY, Nevin ATALAY GENGEÇ'e,

Sevgisini ve desteğini yanımda hissettiğim ismini yazamadığım tüm dostlarıma, arkadaşlarıma ve bu dönemde bana karşı anlayış ve sabır gösteren tüm sevdiklerime teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
2. TEMAS AÇISI	3
2.1. Temas Açısı	3
2.2. Temas Açısı Histeresis	5
2.3. Temas Açısı Ölçümleri	7
2.3.1. Statik Optik Teleskop – Optik Temas Açısı Ölçüm Cihazı (Gonyometre)	8
2.4. Yüzey Gerilimi	9
2.4.1. Katıların Yüzey ve Ara Yüzey Gerilimi	11
2.4.1.1. Van Oss – Good Metodu ile Serbest Yüzey Enerjisi Hesabı	12
3. SÜPERHİDROFOBİK YÜZEYLER	15
3.1. Doğal Süperhidrofobik Yüzeyler	15
3.2. Yapay Süperhidrofobik Yüzeyler	17
3.3.1 Derin Reaktif İyon Aşındırma (DRIE)	18
4. BUHARLAŞMA ve YOĞUNLAŞMA	20
4.1. Saf Madde ve Saf Maddenin Fazları	20
4.2. Faz Diyagramları	22
4.2.1. V-T-p Faz Diyagramı	22
4.2.1.1. p-T Faz Diyagramı	23
4.3. Buharlaşma	24
4.3.1. Atmosferik ve Kuru Hava	24

4.3.1.1. Su Buharı Buhar Basıncı	25
4.3.1.1. Bağlı Nem ve Mutlak Nem	26
4.3.1.3. Çiğlenme Noktası Sıcaklığı	28
4.3.1.3.1. Çiğlenme noktası sıcaklığının psikrometrik diyagram yardımı ile belirlenmesi	29
4.3.1.4. Hava Neminin Ölçüm Metodları	31
4.3.1.4.1. Kuru - Yaş termometre metodu	31
4.3.1.4.2. Çiğ Noktası higrometresi	33
4.3.1.4.3. Saçlı higrometre	34
4.3.1.4.4. Elektriksel direnç higrometre	34
4.3.1.5. Bağlı Nemin Sabitlemesi	34
4.4. Yoğunlaşma	37
4.4.1. Film Tipi Yoğunlaşma	39
4.4.2. Damla Tipi Yoğunlaşma	40
4.4.3. Yoğunlaşan Sıvının Yüzey Kaplama Oranı	45
4.4.4. Su Damlası Oluşumu ve Büyümesi	46
5. DİFÜZYON	49
5.1. Gazlarda Difüzyon	50
5.1.1. Fick' in 1. Difüzyon Kanunu	53
5.2. Sıvı Damlası Buharlaşması ve Sıvı Damlası Buharlaştırması ile Difüzyon Sabitinin Belirlenmesi	54
6. MATERYAL – METOT	61
6.1. Buharlaşma Denemeleri (Mikro desenli yüzeylerin üzerindeki su damlası buharlaşma hızı denemeleri)	61
6.1.1. Numunelerin Hazırlanışı	62
6.1.1.1. Mikro Desenli Yapıların Hazırlanışı	62
6.1.1.2. Mikro Desenli Yapıların Temizlenmesi	65
6.1.1.3. Mikro Desenli Yapıların Süperhidrofobikleştirilmesi	65
6.1.2. Bağlı Nemin Kontrol Edilmesi	66
6.1.3 KSV CAM 200' de Buharlaşma Denemeleri	67

6.2. Yoğunlaşma Denemeleri	69
6.2.1. Yoğunlaşan Sıvının Yüzey Kaplama Oranının Yüzey Özellikleri ile Değişimi Denemeleri	69
6.2.1.1. Temas Açısı Ölçümleri	71
6.2.1.2. Optik Mikroskop	72
6.2.2. Damla Yoğunlaşması ile Su Damlası Büyümesi Denemeleri	73
6.2.2.1. Bağlı Nemin Kontrol Edilmesi	75
6.2.2.2. KSV CAM 200'de Damla Yoğunlaşması ile Su Damlası Büyümesi Denemeleri	78
6.3. Görüntü İşleme ve Analiz Programı (UTHSCSA Image Tool Program)	79
7. BULGULAR ve TARTIŞMA	81
7.1. Buharlaşma Denemeleri (Mikro desenli yüzeylerin üzerindeki su damlası buharlaşma hızı denemeleri)	81
7.1.1. Desen çapı Değişiminin Damla Buharlaşma Hızına Etkisi	81
7.1.2. Kenardan Kenara Mesafe/ Desen çapı Değişiminin Buharlaşma Hızına Etkisi	88
7.2. Yoğunlaşma Denemeleri	94
7.2.1. Yoğunlaşan Sıvının Yüzey Kaplama Oranının Yüzey Özellikleri ile Değişimi	94
7.2.2. Damla Yoğunlaşması ile Su Damlası büyümesi	99
8. SONUÇLAR	106
KAYNAKLAR	108
ÖZGEÇMİŞ	111

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Bir katı üzerinde duran sıvı damlası ve damlanın etkisinde olduğu kuvvetler.	3
2.2. Sıvı damlasının katı bir yüzey üzerindeki kuvvet bileşenleri.	4
2.3. Katı yüzey üzerinde sıvı damlası.	5
2.4. Sıvı damlasının ilerleyen ve gerileyen temas açılarının şematik gösterimi a) İlerleyen temas Açısı b) Gerileyen temas Açısı (face-kyowa.com/en/learning/learning1.html).	6
2.5. Gonyometrik metotla kaydedilmiş veri işleme ve temas açısı ölçüm ekranı.	8
2.6. a) Sıvı içindeki ve yüzeydeki moleküllerin birbiri ile olan etkileşimi b) Örümcek yüzey geriliminden faydalanarak su üzerinde rahatlıkla yürüyebilmektedir (www.ramehart.com/goniometers/surface_tension.jpg, www.nsf.gov/.../water/images/spider.jpg).	10
3.1. Nilüfer çiçeği yaprağı üzerindeki su damlası görüntüleri (conservationreport.com/tag/nature/).	15
3.2. Eğim ile yüzeydeki kirliliğin uzaklaştırılmasına ait örnekler (movingscience.de/uploads/pics/tech_lotuseffekt4.jpg, www.asknature.org/media/image/402).	16
3.3. DRIE' nin şematik gösterimi a) Pasifleştirme tabakasının oluşumu b) Çukurun en alt kısmına SF ₆ ' nin nüfuz etmesiyle aşınması [Kang, 2008].	19
4.1. Katı, sıvı ve gaz fazlarının şematik gösterimi (www.bio.miami.edu/~cmallery/150/chemistry/sf2x10b.jpg).	21
4.2. Donduğunda hacmi genişleyen bir maddenin üç boyutlu faz diyagramı(www.geology.iastate.edu/gccourse/hydro/aspects/images/diagram.gif).	22
4.3. Su için Basınç-Sıcaklık Faz diyagramı (bhs.smuhsd.org/sciencedept/marcan/apchemistry/h2ophase.gif).	23

4.4.	Psikrometrik Diyagram (www.ent.ohiou.edu/~thermo/Applied/Chapt.7_11/Psychro_chart/psych_foggy).	29
4.5.	Çiğlenme noktası sıcaklığının psikrometrik diyagram yardımı ile bulunuşu(www.ent.ohiou.edu/~thermo/Applied/Chapt.7_11/Psychro_chart/psych_foggy).	30
4.6.	Kuru-yaş hazneli psikrometri (www.turkeyforum.com/satforum/showthread.php?t=540527&page=59).	31
4.7.	Saçlı higrometre (www.answers.com/topic/hygrometer).	34
4.8.	Yoğunlaşma olayının sınıflandırılması.	38
4.9.	Film tipi yoğunlaşmanın yatay bir boru yüzeyindeki (a) şematik gösterimi, (b) görüntüsü [Özler, 2007].	39
4.10.	Damla tipi yoğunlaşmanın yatay bir boru yüzeyindeki (a) şematik gösterimi, (b) görüntüsü [Özler, 2007].	40
4.11.	Üzerinde hidrofil ve hidrofob bölgeler bulunduran yüzeylerde yoğunlaşmanın (a) şematik gösterimi [Kumar and Whitesides, 1994], (b) Optik mikroskop görüntüsü [Zhao et al., 1995].	42
4.12.	Yoğunlaşmanın ilerleyen zamanlarında polietilen yüzeyindeki damlaların görüntüsü [Briscoe, 2005].	46
4.13.	Damla büyüme mekanizmalarının şematik gösterimi 1. Direk olarak sıcaklık gradyentine bağlı olarak damlaya su buharının difüzyonlanması, 2.Yüzeyde oluşan damlaların yüzeyde damlaya difüzyonlanması. 3. Küçük damlaların oluşması, büyümesi, birleşmesi. TL; Üçlü faz temas çizgisi, (Three phase contact line) [Beysens, 2006].	47
4.14.	Birleşim işleminin örnek bir fotoğrafı [Narhe, 2003].	48
5.1.	Difüzyon olayının şematik gösterimi (missbakersbiologyclasswiki.wikispaces.com/Test+Study+Guide?f=print).	49
5.2.	Gaz moleküllerinin birbirleri içindeki difüzyonu (www.tutorvista.com/ks/diffusion-constant-in-water).	51
5.3	Katı bir yüzey üzerinde buharlaşan bir sıvı damlasına ait sabit temas açısı, sabit temas yarıçapı, karışmış buharlaşma modelleri [Li, 2009].	54

5.4.	Küresel damla üzerindeki h , r_b , R ve θ değerlerinin gösterilmesi (mathworld.wolfram.com/SphericalCap.html).	57
6.1.	Pleksiglass hücre.	62
6.2	GYTE 41, GYTE 44, GYTE 45 numunelerine ait 1500x büyütme ve 45° eğimli SEM görüntüleri.	64
6.3.	TFA marka termo- higrometre.	67
6.4.	KSV CAM 200 cihazında yandan görüntüleme sistemi.	68
6.5.	Yoğunlaşma denemelerinin gerçekleştiği sirkülatör, bakır soğutucu ve bakır plakadan oluşan sistem.	70
6.6	KSV CAM 200 temas açısı ölçümü.	71
6.7.	NIKON ECLIPSE LV 100 optik mikroskop.	72
6.8.	Proflu TFA marka termo-higrometre.	76
6.9	Testo 615 termo- higrometre.	76
6.10	Damla yoğunlaşması ile su damlası büyümesi denemelerinin gerçekleştirildiği sistem.	78
6.11	Görüntü işleme ve analiz programında a) yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranı belirlenmesi b) temas açısı c) yükseklik, h ve temas yarıçapı, r_b ölçümü.	79
6.12	Yoğunlaşma sonrasında sırası COC - HDPE yüzeylerinde oluşan damlaların (a) 50x büyütmede çekilmiş optik mikroskop görüntüsü, (b) Yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranının belirlenmesi amacı ile kullanılan optik mikroskop görüntülerinin siyah-beyaz (treshold) hali.	80
7.1	Desen çapı 9.56 μm , 15.44 μm , 19.85 μm , 25.00 μm olan numuneler üzerindeki su damlası yüksekliğinin zamanla değişimi grafiği.	84
7.2	Desen çapı 9.56 μm , 15.44 μm , 19.85 μm , 25.00 μm olan numuneler üzerindeki su damlasının temas yarıçapının zamanla değişim grafiği.	84
7.3	Desen çapı 9.56 μm , 15.44 μm , 19.85 μm , 25.00 μm olan numuneler üzerindeki su damlasının temas açısının zamanla değişim grafiği.	85

7.4	Desen çapı 9.56 µm, 15.44 µm, 19.85 µm, 25.00 µm olan numuneler üzerindeki su damlası hacminin zamanla değişim grafiği.	85
7.5	Desen çapı 9.56 µm, 15.44 µm, 19.85 µm, 25.00 µm olan numunelerdeki $V^{2/3}$ ün zamanla değişim grafiği.	86
7.6	Desen çapı ile buharlaşma hızının değişimi grafiği.	87
7.7	s/d değeri 2.62, 1.54, 1.22, 1.08, 0,97 olan numuneler üzerindeki su damlasının yüksekliğinin zamanla değişim grafiği.	90
7.8	s/d değeri 2.62, 1.54, 1.22, 1.08, 0,97 olan numuneler üzerindeki su damlasının temas yarıçapının zamanla değişim grafiği.	90
7.9	s/d değeri 2.62, 1.54, 1.22, 1.08, 0,97 olan numuneler üzerindeki su damlasının temas açısının zamanla değişim grafiği.	91
7.10	s/d değeri 2.62, 1.54, 1.22, 1.08, 0,97 olan numuneler üzerindeki su damlasının hacminin zamanla değişim grafiği.	91
7.11	s/d değeri 2.62, 1.54, 1.22, 1.08, 0,97 olan numuneler üzerindeki su damlasının $V^{2/3}$ ün zamanla değişim grafiği.	92
7.12	Kenardan kenara mesafe (s) / desen çapı (d) oranı ile $dV^{2/3}/dt$ değişimi grafiği.	93
7.13	Yoğunlaşma sonrasında sırası ile PEF- MMA, PP - EVA, COC - PP, PP-PE, COC - HDPE yüzeylerinde oluşan damlaların (a) 50x büyütmede çekilmiş optik mikroskop görüntüleri, (b) Yüzey kaplama oranının belirlenmesi amacı ile kullanılan optik mikroskop görüntülerinin siyah-beyaz (treshold) halleri.	96
7.14	Denge temas açısı ile yüzey kaplama oranı değişimi grafiği.	97
7.15	Serbest yüzey enerjisi ile yüzey kaplama oranı değişimi grafiği.	97
7.16	Temas açısı histeresis ile yüzey kaplama oranı değişimi grafiği.	98
7.17	Damlanın (a)büyüme öncesi (b) büyüme sonundaki görüntüleri.	99
7.18	Zamanla damla yüksekliğinin değişimi grafiği.	101
7.19	Zamanla temas yarıçapının değişimi grafiği.	101
7.20	Zamanla temas açısının değişimi grafiği.	102
7.21	Zamanla damla hacminin değişimi grafiği.	102
7.22	Zamanla $V^{2/3}$ değişimi grafiği.	103

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Çizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. van Oss-Good yönteminde kullanılan yüzey gerilimi bileşenlerinin çeşitli test sıvıları için kullanılan değerleri (mN/m) [Erbil, 2006].	14
4.1. Kuru havanın özellikleri.	24
4.2. Bazı doymuş tuz çözeltilerinin farklı sıcaklıklardaki bağıl nem değerleri [Winston, 1960].	36
4.3. Yoğunlaşma Çeşidi Kriteri [Ma, 2000].	41
6.1. Numunelerin düzlemsel silindirik yerleşmiş desenlerin desen çapı, iki desen arasındaki mesafesi, desenlerin yüksekliği ve numunelerin denge temas açısı değerleri.	64
6.2. Kullanılan higrometrelerin sıcaklık ve bağıl nem değerleri.	77
7.1. Numunelere ait desen çapı, kenardan kenara mesafe, yükseklik, s/d, denge temas açısı değerleri.	81
7.2. Desen çapı 9,56 μm olan numuneye ait deneysel h, r_b , θ_e , V, $V^{2/3}$ verileri.	82
7.3. Desen çapı 15,44 μm olan numuneye ait deneysel h, r_b , θ_e , V, $V^{2/3}$ verileri.	82
7.4. Desen çapı 19,85 μm olan numuneye ait deneysel h, r_b , θ_e , V, $V^{2/3}$ verileri.	83
7.5. Desen çapı 25,00 μm olan numuneye ait deneysel h, r_b , θ_e , V, $V^{2/3}$ verileri.	83
7.6. Desen çapı, $dV^{2/3}/dt$ ve R^2 değerleri.	87
7.7. Numunelere ait desenlerin s/d, kenardan kenara mesafe, desen çapı, yükseklik, denge temas açısı değerleri.	88
7.8. s/d değeri 1.54 olan numuneye ait deneysel h, r_b , θ_e , V, $V^{2/3}$ verileri	89
7.9. s/d değeri 1.08 olan numuneye ait deneysel h, r_b , θ_e , V, $V^{2/3}$ verileri.	89
7.10. s/d, $dV^{2/3}/dt$ ve R^2 değerleri.	93
7.11. Numunelerin metilen iyodür, α -bromonaftalen, formamit ve etilen glikol sıvıları ile elde edilen denge temas açısı ile hesaplanmış serbest yüzey enerjisi değerleri.	95

7.12	Numunelere ait Serbest Yüzey Enerjisi, Su Temas Açısı, ; Açısı Histeresis, Yüzey Kaplama Oranı Değerleri.	95
7.13.	90% bağıl nem 13 °C‘ de 1. denemeye ait h , r_b , θ_e , V , $V^{2/3}$ deneysel veriler.	100
7.14.	90% bağıl nem 13 °C‘ de 2. denemeye ait h , r_b , θ_e , V , $V^{2/3}$ deneysel veriler.	100
7.15	Deneme koşulları, yüzeyin ve damlanın başlangıç koşulları, damlanın hacim büyümesi değerleri.	103
7.16	Farklı sıcaklıklardaki difüzyon sabiti değerleri.	104
7.17.	$dV^{2/3}/dt$ eğim, $f(\theta)$ ’lı ve $f(\theta)$ ’süz eğim değerleri ve $dV^{2/3}/dt$ eğim değerlerinin $f(\theta)$ ’lı ve $f(\theta)$ ’süz eğimlerden % olarak sapma değerleri.	105

1. GİRİŞ

Hava belirli sıcaklıklarda içerisinde belirli miktarda su buharı bulundurmaktadır. Özellikle kuraklığın dünya çapında bir problem olarak görülmesi ile araştırmacılar hava içerisindeki su buharını sıvı hale dönüştürüp suyu geri kazanma yolları aramaktadır. Bu çalışma ayın sadece 6 günü sabahları ortaya çıkan sis damlacıklarının su kaynağı olduğu Güney Afrika' daki Namib Çölü'nde yaşayan stenocara böceğinin yaşamını rahat bir şekilde sürdürebilmesinin farkına varılması ile hız kazanmıştır. Böceğin yaşamının devamlılığının sürdürebilmesinin temeli ise sırtındaki süperhidrofobik tepe ve hidrofilik yamaç bölgelerin varlığı sayesinde süperhidrofob kısımlara yoğuşan su damlalarının eğim sayesinde yuvarlanarak hidrofil kısımlara varması ile su ihtiyacını karşılamasıdır.

Havada bulunan mevcut nemi toplamak için 22 ülkede nem toplama ünitesi bulunmaktadır ve çalışmalar devam etmektedir. Beysens et al., TiO_2 ve $BaSO_4$ mikro kürecikler içeren polietilen malzeme kullanarak 6 ayda 200 litre su toplamışlardır [Beysens, 2006]. Parker ve Lawrence, stenocaranın sırtını taklit eden bir kaplama üreterek su toplama verimini ölçmüşlerdir. Buna göre plastik sis toplama ağı metrekarede 13 litre toplarken stenocara tasarımı 23 litre su toplamakta olduğunu görmüşlerdir [Parker, 2001].

Yoğunlaşma, su buharının, ortamda bulunan ve doygunluk sıcaklığından daha düşük sıcaklıktaki bir yüzey üzerinde, sıvı haline dönüştüğü bir faz değişim olayıdır. Katı yüzeyler üzerinde yoğunlaşma film halinde ve damla halinde oluşmaktadır. Katı yüzeyler üzerinde yoğuşan sıvı damlacıklar halinde ise buna “*damla yoğunlaşması*” adı verilmektedir ve ısı aktarımını arttırdığından daha avantajlıdır.

Yüzeylerde damla yoğunlaşması gerek havada bulunan mevcut nemin geri kazanılması, gerekse ısı aktarım performansını artırıcı etkisi nedeniyle oldukça önem kazanmıştır [Leach, 2006]. Havada bulunan mevcut su buharının sıvı hale dönüştürülmesi ile su damlasının büyümesi literatürdeki mevcut difüzyon denklemleri ile açıklanmayı gerektirmektedir. Havadaki su buharının küçük bir

damla üzerinde yoğunlaşarak bu su damlasını büyütmesinin, literatürdeki difüzyon denklemleri ile açıklanması pek az çalışılmıştır [Sokuler, 2010].

Yüzeylerde yoğunlaşmanın meydana gelmesi ile yoğunlaşan damlalar yüzeyde belirli bir alan işgal etmektedir. Damlaların yüzeyde kapladığı alan yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranı şeklinde tanımlanır ve damlaların kapladığı yüzey alanı toplamının damlaların olduğu yüzeyin alanına oranıdır. Yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranı yüzeyin özelliklerine bağlıdır. Temas açısı yüksek olan yüzeyler üzerinde sıvı damla halinde ve küresel olarak oluşacağından yüzeyde oluşan diğer damlalar ile birleşmesi gecikecektir [Boreyko, 2009; Beysens, 2006]. Damlaların birleşmesi mevcut tek damlanın büyümesine engel teşkil etmektedir.

Buharlaşma, doğadaki temel olaydan biridir ve yoğunlaşmanın tersidir. Damla buharlaşması, püskürtmeli benzin motorları, püskürtmeli yazıcılar, tarımsal ilaçlama gibi birçok endüstriyel işlemlerde kullanılmaktadır. Düz Teflon film yüzeyinde [McHale et al. 1998; Tosun 2009], nano ölçekte pürüzlü yüzeyler üzerinde [Furuta, 2009], desenli yüzeyler üzerinde [McHale, 2005] su damlasının buharlaşması incelenmiş olup buharlaşmanın sabit temas açısında gerçekleştiği sonucuna ulaşılmıştır. Düz yüzeylerde yapılan çalışmalar sonucunda difüzyon mekanizması açıklanmıştır. Desenli süperhidrofobik yüzeyler üzerinde desen geometrisinin buharlaşma hızına etkisi az incelendiğinden merak konusu olmuştur.

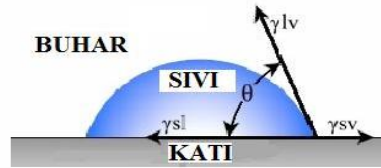
Bu tez çalışması üç kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısımda dimetildiklorosilan kaplı mikro desenli süperhidrofobik yüzeylerin üzerinde desen geometrisi farklılığının buharlaşma hızına etkisi incelenmiştir. Numuneler üzerinde oluşturulan 5 µl su damlasının buharlaşması sabit bağıl nem koşullarında pleksiglas hücre içerisinde takip edilmesi ile buharlaşma hızları belirlenmiştir. İkinci kısımda yüzey özellikleri birbirinden farklı beş polimer yüzey üzerinde soğutma sistemi yardımı ile damla yoğunlaşması gerçekleştirilerek yüzey özelliklerinin yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranına etkisi incelenmiştir. Üçüncü kısımda ise Teflon FEP100 yüzeyi üzerinde oluşturulan 1 µl su damlasının soğutma sistemi yardımı ile sabit bağıl nem koşullarının pleksiglas hücre içerisinde sağlandığı durumda damla yoğunlaşması gerçekleştirilerek, yoğunlaşma sırasında su damlasının büyümesi takip edilmiş ve difüzyon denklemleri ile uyumluluğu incelenmiştir.

2. TEMAS AÇISI

2.1. Temas Açısı

Çiğ oluşumunda ya da yağmur sonrasında bitkilerin üzerindeki sıvı kalıntılarının damla şekli aldığı günlük yaşantıda gözlemlenebilir bir durumdur. Bu gibi durumlarda katı-sıvı-buhar üçlü fazında sıvı-buhar ara yüzeyi ve katı-sıvı ara yüzeyi arasında bir açı meydana gelir ve bu açı 'temas açısı' olarak tanımlanır. Temas açısı başka bir deyişle, bir sıvı veya gazın bir katı yüzey ile teması sonucu yüzeyde yayılmasına bağlı olarak yaptığı açı olarak tanımlanmaktadır.

Bir katı yüzeyinde bir sıvı damlasının Şekil 2.1' de görüldüğü gibi hareketsiz bir şekilde halini göz önünde bulunduralım. Damla etkisinde bulunan üç kuvvetin etkisi ile dengededir. Bu kuvvetler katı ile sıvı arasındaki ara yüzey gerilimi, γ_{sl} , katı ile buhar arasındaki arayüzey gerilimi, γ_{sv} ve sıvı ile buhar arasındaki arayüzey gerilimi, γ_{lv} , şeklindedir. Temas açısı, θ , katı, sıvı ve gazın kesiştiği üçlü faz sınırında oluşur.

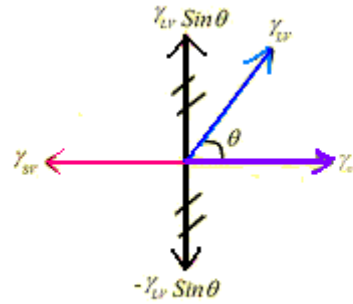


Şekil 2.1. Bir katı üzerinde duran sıvı damlası ve damlanın etkisinde olduğu kuvvetler.

1805 yılında T. Young temas açısı dengesini ilk kez açıklayan kişidir. Üçlü faz noktasında kuvvetlerin vektörel toplamı;

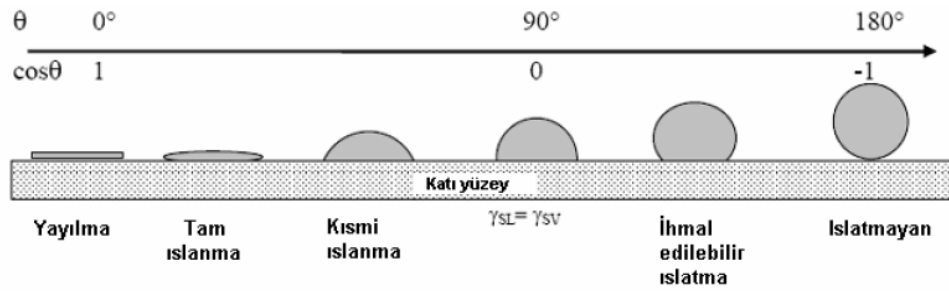
$$\gamma_{SV} = \gamma_{SL} + \gamma_{LV} \cos\theta \quad (\text{Young Eşitliği}) \quad (2.1)$$

şeklinde verilmektedir. Burada; γ , yüzey gerilimini (veya serbest yüzey enerjisi) verir. Eğer katının yüzey enerjisi yüksek ise, yani $\gamma_{SV} > (\gamma_{SL} + \gamma_{LV})$ ise, Young eşitliği $\theta=0$ olacağından, ($\cos\theta=1$) olur ki bu da o katı üzerinde sıvının tamamen yayıldığını gösterir. Diğer yandan üçlü faz temas noktasında vektörel kuvvetleri dengelemek üzere, yukarı doğru ($\gamma_{LV} \sin\theta$) bileşeni bulunur. Şekil 2.2 de görüldüğü gibi bu kuvvet, katının yüzey alanı gerinimine karşılık gelen ($-\gamma_{LV} \sin\theta$) kuvveti tarafından dengelenir.



Şekil 2.2. Sıvı damlasının katı bir yüzey üzerindeki kuvvet bileşenleri.

Temas açısı bir sıvı tarafından katının ıslatılabilirliğinin nicel ölçüsüdür. Çok fazla uçucu olmadıkça ve düşük bir viskoziteye sahip olan herhangi bir sıvı (cıva gibi sıvı metalleri dahil) sıvı damlası olarak kullanılabilir. Düşük θ değerleri güçlü bir katı- sıvı etkileşmesini gösterir. Bu durumda sıvı katıyı iyi ıslatır ve katı üzerinde yayılır. Bununla beraber yüksek θ değerleri zayıf etkileşim ve zayıf ıslatma gösterirler. Eğer $\theta < 90^\circ$ ise sıvının katıyı ıslattığı söylenir. Sıfır temas açısı tamamen ıslatmayı gösterir. Eğer $\theta > 90^\circ$ ise, sıvı katıyı ıslatmaz.



Şekil 2.3. Katı yüzey üzerinde sıvı damlası.

Temas açısının 0° ile 90° arasında olduğu durumlarda yüzeylere hidrofilik, 90° ile 150° arasında olduğu durumlarda yüzey hidrofobik, 150° 'den büyük olan yüzeylere ise süperhidrofobik yüzeyler denir. Ayrıca temas açısının 5° ' den düşük olan yüzeyler süperhidrofilik ve temas açısının 160° ' den büyük olduğu yüzeyler ise ultrahidrofobik yüzeyler olarak adlandırılmaktadır.

2.2. Temas Açısı Histeresis

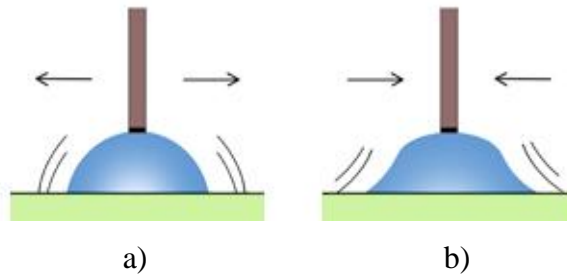
Young denkleminde göre yüzey ideal olmalıdır. İdeal yüzeyler; kimyasal homojenliğe sahip, pürüzsüz, buhar veya sıvı tutunan kimyasal etkileşmelere uğramamalıdır. Yüzeyinde bu istenilenler sağlanırsa, tek bir temas açısı ölçülür. Gerçek (heterojen ve pürüzlü) yüzeylerde ise damla temas eden hatlar boyunca farklı temas açıları verebileceğinden tam anlamıyla Young değerinde değildir fakat onun civarında belirli bir aralıkta değişir. İdeal olmayan bir yüzey üzerinde bulunan bir damla için yüzeye eğim verilecek olursa temas açısı ilerleyen sıvı kenarında maksimum ve gerileyen sıvı kenarında minimum değerine ulaşır. Bu yüzden maksimum ve minimum değerler sırasıyla “ilerleyen” ve “gerileyen” temas açıları olarak adlandırılır. Her damla - katı sistemi için üçlü faz çizgisi aşılmadan önce ilerleyen temas açısının maksimum bir değeri vardır. İlerleyen ve gerileyen temas açısı arasındaki fark temas açısı histeresisi olarak adlandırılır.

$$\theta_{\text{his}} = \theta_A - \theta_R \quad (\text{ideal halden sapmayı gösterir}) \quad (2.2)$$

Denklemdede θ_{his} , temas açısı histeresis; θ_A , ilerleyen temas açısı; θ_R , gerileyen temas açısı değeridir. Pratikte ilerleyen temas açısı gerileyen temas açısından büyüktür, denge temas açısı ise ilerleyen ve gerileyen temas açılarının arasında bir değerdedir

Temas açısı karmaşası yüzeyin homojen olmayışı ile ve pürüzlülük gibi ideal olmayan durumlarla ilişkilendirilir. Fakat olayın temeli tam anlamıyla keşfedilmemiştir.

Katı bir yüzey üzerinde ilerleyen ve gerileyen temas açılarını katı yüzeye eğim vermeden de ölçmek mümkündür. İlerleyen temas açısını ölçmek için Şekil 2.4' de görüldüğü gibi yüzey üzerinde şırınga ile oluşturulan su damlası ve şırınga birbirleriyle temas ettirilerek su damlasının hacmi artırılır. Bu şekilde ölçülen temas açısı ilerleyen temas açısıdır ve denge temas açısından büyük bir değere sahiptir. Gerileyen temas açısını ölçerken ise, şırınga ve su damlası yine birbirleriyle temas ettirilir ve su damlasının hacmi çekilerek azaltılır. Bu şekilde ölçülen temas açısı da gerileyen temas açısıdır ve değeri denge temas açısından küçüktür. Çünkü adhezyon işi kuru yüzey için önceden ıslatılmış olandan daha azdır. Katı sıvıyla ilk temas ettiğinde bir miktar sıvıyı adsorblar. Bu yüzden katı yüzeyinin karakteristiği değişmiş olur.



Şekil 2.4. Sıvı damlasının ilerleyen ve gerileyen temas açılarının şematik gösterimi a) İlerleyen temas Açısı b) Gerileyen temas Açısı (face-kyowa.com/en/learning/learning1.html).

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, ilerleyen ve gerileyen temas açıları arasındaki fark o kadar az olur. Heterojenliğin olmadığı, tamamen homojen ve pürüzsüz yüzeylerde (ideal yüzeylerde) ilerleyen ve gerileyen temas açıları birbirine eşittir.

Yüzeyin pürüzlülüğü ve katı yüzeyindeki mikroskopik kimyasal heterojenlik temas açısı histeresisini etkileyen en önemli faktörlerdir. Bunun yanında kullanılan sıvının ve yüzeyin kirliliği, damla boyutu etkisi, yüzeydeki molekülerin yer değiştirmesi ve deformasyon, gözenekler arasına giren sıvı moleküllerinin boyutu ve katı yüzeyindeki yarıklar histeresisini etkileyen diğer faktörlerdir.

2.3. Temas Açısı Ölçümleri

Temas açısı ölçümü ilk karşılaşıldığında oldukça kolay gibi görünse de termodinamik açıdan temasının doğru bir şekilde ölçümü için çok itinalı çalışma gerekir. Damla oluşumu esnasında yüzeyin uygun şekilde hazırlanmasına ve oldukça saf sıvıların kullanılmasına dikkat edilmediğinde, ayrıca ölçüm esnasında damla buharlaşması, damla içerisinde iğnenin yerleşimi ve damlanın şeklinin kesin görüntüsü gibi önemli konular göz önüne alınmadığında hatalı ve genellikle kullanışsız temas açısı değerleri elde edilir.

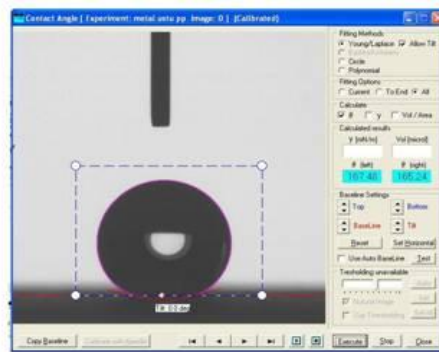
Temas açısı ölçümü için birçok farklı metot geliştirilmiştir fakat günümüzde sadece birkaçı yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Tercih edilen iki yöntem: video kamera veya gonyometre kullanımı ile gözeneksiz düzgün yüzey üzerinde duran damlanın statik temas açısı ölçümü ve test sıvısı içerisine dinamik düzgün katı plakanın daldırılıp çekilmesi ile iç-etkileşim kuvvetlerinin ölçümüne dayanan tensiyometre kullanımıyla dinamik temas açısı ölçümüdür [Erbil, 2006].

2.3.1. Statik Optik Teleskop – Optik Temas Açısı Ölçüm Cihazı (Gonyometre)

Düz bir katı yüzey üzerindeki durgun damlanın temas açısı gonyometre adı verilen cihaz kullanılarak ölçülür. Gonyometre; açıölçer göz merceği bulunan mikroskop kullanarak veya son zamanlarda daha geliştirilmiş uygun büyütme lensli, çekilen resimde tanjant değerini resim-analiz yazılımı yardımı ile belirleyen bilgisayar kontrollü bir video kamera ile donatılmış bir cihazdır. Cihazda uygun soğuk ışık kaynağı ve numunenin yerleştirilmesi için numune standı mevcuttur. Numune standı ile yöntemin uygulanabilmesi için gerekli olan hassasiyetle yukarı ve aşağı, ileri-geri hareket ettirilebilir.

Gonyometrik olarak temas açısı; katının üzerinde sıvının bulunduğu durgun damla yöntemi (Sessile Drop Method) ve yakalanmış kabarcığın katının altında olduğu yakalanmış kabarcık yöntemi (Capture Bubble Method) şeklinde iki yöntem ile ölçülür.

Durgun damla yönteminde, damla profili fotoğraflanır ve durağan damlanın temas açısının belirlenmesi görüntü üzerinde üçlü-faz temas noktasında damla profilinin tanjantı bulunarak temas açısı hesaplanmaktadır. Statik temas açısı ölçümünde sonuçlar biraz operatöre bağlıdır.



Şekil 2.5. Gonyometrik metotla kaydedilmiş veri işleme ve temas açısı ölçüm ekranı.

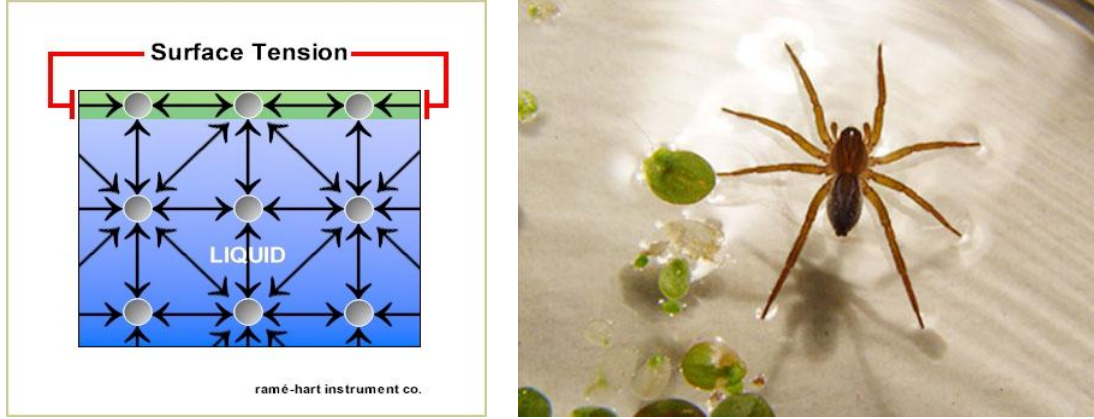
Yakalanmış kabarcık yöntemi de üçlü faz dengesine dayanmaktadır. Yakalanmış hava kabarcığı, katı ile temas eden sıvı içerisinde, katının alt yüzeyinde ucu kıvrık mikrometre şırınga yardımıyla oluşturulur. Temas açısı gonyometrik mikroskop veya video kamera ile ölçülür.

Statik temas açısı ölçüm yöntemleri basit ve kullanışlıdır. Ölçüm almaya yeterli derecede düz olan ve cihaza yerleştirilebilecek şekilde herhangi bir katı ile ölçüm alınabilir. Denemeler çok az miktarda sıvı kullanılarak yapılabilir. Ancak ölçümlerde tanjant çizgisinin belirlenmesi araştırmacının subjektifliğine ve tutarlılığına bağlıdır. Bu hatalı ölçüm alınmasına sebep olabilir [Erbil, 2006].

2.4. Yüzey Gerilimi

Bir arayüzey iki komşu yığın faz arasındaki fiziksel sınırdır. Yüzey kelimesi ise bu yığın fazlardan sadece birinin fiziksel sınırını tanımlamak için kullanılır. Katı yüzeyi, sıvı yüzeyi vb. Gerçekte katılar için mutlak vakum durumları haricindeki tüm durumlarda arayüzeylerle ilgilenilir. Çünkü katı-hava, sıvı-hava gibi her faz bir diğer fazla temas halindedir.

Gazlarda söz konusu olmayan yüzey gerilimi sıvı ve katılara özgü bir olgudur. Dengelenmemiş kuvvetlerden doğan yüzey geriliminin canlı ve cansız varlıklar için önemi büyüktür. Kütle çekim kuvvetinin olmadığı bir yere örneğin uzay boşluğuna bırakılan bir miktar sıvı küre şeklini alarak hemen en küçük yüzey alanına sahip olur. Sıvının içerisindeki moleküller üzerine etkiyen çekim kuvvetlerinin bileşkesi sıfır olduğu halde sıvı yüzeyindeki moleküller sıvı içerisine doğru çeken net bir kuvvetin etkisi altındadır. Yüzeyi küçültmeye çalışan bu kuvvetleri yenmek için dışarıdan sıvıya enerji vermek gerekmektedir. Sabit sıcaklık ve basınçta molekülleri yığın fazdan yüzeye getirerek yüzey alanını 1m^2 arttırabilmek için gerekli iş ‘serbest yüzey enerjisi’ olarak adlandırılır ve " γ " ile gösterilir. SI birimi J/m^2 dir. Yüzey biliminde genellikle daha öncelardan kullanılan ergs/cm^2 birimi ile eş tutabilmek için mJ/m^2 birimi kullanılmaktadır.



Şekil 2.6. a) Sıvı içindeki ve yüzeydeki moleküllerin birbiri ile olan etkileşimi
 b) Örümcek yüzey geriliminden faydalanarak su üzerinde rahatlıkla yürüyebilmektedir (www.ramehart.com/goniometers/surface_tension.jpg, www.nsf.gov/.../water/images/spider.jpg).

Birbiri ile karışmayan aralarında düzgün bir ara yüzey olan iki faz söz konusu olduğunda serbest arayüzey enerjisi şeklinde tanımlanabilir ve γ_{12} simgesi kullanılabilir. Bu durumda, iki yığın fazdaki molekülleri ara yüzeye getirecek ve ara yüzeyi 1 m^2 arttırmak için bir iş gereklidir. Moleküller arasındaki kuvvetler sıvı-buhar sisteminde görülen durumdaki yüzey molekülleri gibi davranır, ancak buharın daha yoğun bir faz ile yer değiştirmesi sonucunda ara yüzeydeki alışılmışın dışında olan moleküllerin karşılıklı etkileşimleri daha etkindir. Bu sebeple; serbest arayüzey enerjisi, bahsedilen moleküllerin ara yüzey üzerindeki etkisini belirten ‘aşırı serbest yüzey enerjisi’ olarak daha doğru bir şekilde tanımlanır.

Bir maddenin (1) yüzey gerilimi, γ_1 , yüzey alanını minimize etmek için yüzey çizgisi üzerinden madde içerisine dikey olarak molekül yönelmesini sağlayan kuvvettir. Birimi birim uzunluğa düşen kuvvet şeklindedir (N/m veya genellikle mN/m). Maddelerin yüzey gerilimi ve serbest yüzey enerjisi boyutsal olarak eş değerdir ($\text{N/m} = \text{J/m}^2 = \text{kg/s}^2$) ve saf sıvıların buharları ile dengede olduğu durumda sayısal değerleri de aynıdır. Yüzey gerilimi ve serbest yüzey enerjisi terimleri birbirinden farklıdır.

Serbest yüzey enerjisi termodinamik terimlerde temel özelliktir ve yüzey gerilimi yüzeyde hiç adsorpsiyon olmadığı durumlarda serbest yüzey enerjisine eşit alınabilir. Diğer yandan; yüzey gerilim birimi (N/m), yığın basıncı biriminin (N/m^2) iki boyutsal analogudur ve bu yüzden yüzey gerilimi iki boyutlu negatif basınç olarak kabul edilebilir.

Birbiriyle karışmayan iki faz varlığıyla oluşan ara yüzey söz konusu olduğunda ara yüzey gerilimi tanımlanmalıdır, γ_{12} , ara yüzey gerilimi; ara yüzey alanını minimize edebilmek için ara yüzey üzerindeki molekülleri bulk fazlarına dikey olarak yönlendirebilmek için gerekli kuvvettir. Sıvılar arasındaki ara yüzey, serbest yüzey enerjisi birim olarak eş değer iken nümerik olarak da birbirine eşittir [Erbil, 2006].

Sıvıların ve çözeltilerin yüzey/arayüzey gerilimleri; Sesil damla profili metodu, sarkan damla profili metodu, kapiler yükselme metodu, Wilhemly plaka metodu, Du Noüy halka metodu, maksimum kabarcık basıncı metodu ile tayin edilebilmektedir.

Yüksek kohezyon enerjisine sahip maddelerin yüzey gerilimi tanımından da anlaşılacağı gibi yüksek yüzey gerilimine sahiptir. Katı malzemelerin kohezyon enerjileri yüksek olduğundan yüzey gerilimleri yüksektir. Sıcaklığın artışı madde içindeki molekülleri daha hızla titreşeceklerinden ve titreşim genlikleri artacağından moleküller arasındaki kohezyon enerjisinin azalmasıyla yüzey gerilimi azalacaktır.

2.4.1. Katıların Yüzey ve Ara Yüzey Gerilimi

Sıvıların yüzeyinde bulunan moleküllerin yer değiştirmesinin aksine katı maddelerin yüzeyindeki moleküller buldukları konumu korurlar. Her bir atom ve molekül ortalama konumlarında sadece titreşme hareketi yaparlar. Sonuç olarak, katı yüzeyler kendiliğinden yüzey alanlarını en aza indirecek şekilde küçülemezler. Bu durum katılarda yüzey gerilimi olmadığı anlamına gelmemektedir. Prensip, tüm katılarda aynı sıvılardaki gibi kohezyon sebebiyle yüzey gerilimi mevcuttur. Ancak, yüzey gerilimine bağlı yüzey şekli değişimi katılarda sıvılara oranla oldukça yavaştır.

Bu, kohezyon kuvvetlerinin küçüklüğünden değil yüzey moleküllerinin (veya atomlarının) hareketliliğinin çok az olmasından kaynaklanmaktadır. Katıların yüzey gerilimi ölçümünde sıvılardaki gibi direkt ölçüm metotları yoktur. Bu yüzden katıların yüzey gerilimi temas açısı ölçümüyle dolaylı olarak ölçülür. Owens Wendt ve van Oss Good yöntemi ile katıların serbest yüzey enerjisi hesaplanabilmektedir. Burada van Oss-Good metodu üzerinde durulacaktır [Erbil, 2006].

2.4.1.1. Van Oss – Good Metodu ile Serbest Yüzey Enerjisi Hesabı

Van Oss – Good metodunun bir diğer ismi asit-baz yaklaşımıdır. 1985 yılında makroskopik sistemler arasındaki etkileşimi anlatan Lifshitz teorisi temel alınarak van Oss, Good ve Chaudhury tarafından katı yüzeylerin serbest yüzey enerjisinin hesaplanması için yeni bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde katı yüzeyleri Lifshitz- van der Waals etkileşimlerini simgeleyen γ_s^{LW} ve asit baz etkileşimlerini simgeleyen γ_s^{AB} terimlerini içermektedir. γ_s^{LW} dispersiyon, dipolar ve indüksiyon etkileşimlerinin tümünü içermektedir. γ_s^{AB} asit baz etkileşim terimi hidrojen bağlarındaki gibi tüm donör-akseptör elektron etkileşimlerini içermektedir. Bu yöntemde adhezyon işi 2.3 eşitliği ile ifade edilmektedir.

$$-W_a = \Delta G_{SL} = \Delta G_{SL}^{LW} + \Delta G_{SL}^{AB} \quad (2.3)$$

Yukarıdaki denklemin ΔG_{SL}^{LW} 'nin 2.4 eşitliği şeklindedir.

$$\Delta G_{SL}^{LW} = \sqrt{\Delta G_S^{LW} \Delta G_L^{LW}} \quad (2.4)$$

Bu denklem Fowkes yaklaşımı ile uyumlu olması nedeni ile γ_{SL}^{LW} 2.5 nolu eşitlik ile ifade edilmektedir.

$$\gamma_{SL}^{LW} = \gamma_S^{LW} + \gamma_L^{LW} - 2(\sqrt{\gamma_S^{LW} \gamma_L^{LW}}) \quad (2.5)$$

$$-\Delta G_{SL}^{LW} = \gamma_S^{LW} + \gamma_L^{LW} - \gamma_{SL}^{LW} \quad (2.6)$$

Eşitlik 2.5 ile 2.6'nın birleştirilmesi ile

$$-\Delta G_{SL}^{LW} = 2\sqrt{\gamma_S^{LW} + \gamma_L^{LW}} \quad (2.7)$$

elde edilmektedir.

van Oss-Good etkileşimlerini 2.8 eşitliği ifade etmektedir.

$$-\Delta G_{SL}^{AB} = 2(\sqrt{\gamma_S^+ \gamma_L^-} + \sqrt{\gamma_S^- \gamma_L^+}) \quad (2.8)$$

2.7 ve 2.8 eşitliğinin 2.3 eşitliği ile birleştirilmesi ile 2.9 denklemi elde edilmektedir.

$$-\Delta G_{SL} = 2[\sqrt{\gamma_S^{LW} \gamma_L^{LW}} + \sqrt{\gamma_S^+ \gamma_L^-} + \sqrt{\gamma_S^- \gamma_L^+}] \quad (2.9)$$

Young- Dupre eşitliği 2.10 numaralı eşitlik olarak aşağıda verilmiştir.

$$-\Delta G_{SL} = W_a = \gamma_{LV}(1 + \cos \theta) \quad (2.10)$$

Young-Dupre ve 2.9 numaralı eşitliğin birleştirilmesi ile serbest yüzey enerjisi hesabı için kullanılan 2.11 numaralı eşitlik elde edilmektedir

$$\gamma_{LV}(1 + \cos \theta) = 2[\sqrt{\gamma_S^{LW} \gamma_L^{LW}} + \sqrt{\gamma_S^+ \gamma_L^-} + \sqrt{\gamma_S^- \gamma_L^+}] \quad (2.11)$$

Serbest yüzey enerjisi hesabı için kullanılan diğer eşitlikler ise;

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

$$\gamma_{LV} = \gamma_{LV}^{LW} + \gamma_{LV}^{AB} \quad (2.13)$$

$$\gamma_{LV}^{AB} = 2\sqrt{\gamma_{LV}^+ + \gamma_{LV}^-} \quad (2.14)$$

$$\gamma_S = \gamma_S^{LW} + \gamma_S^{AB} \quad (2.15)$$

$$\gamma_S^{AB} = 2\sqrt{\gamma_S^+ \gamma_S^-} \quad (2.16)$$

Serbest yüzey enerjisi yüzeyde çeşitli test sıvılarının denge temas açısı ölçülmesi ile test sıvılarının yüzey gerilim değerlerinin 2.11, 2.12, 2.13, 2.14, 2.15, 2.16 denklemlerinde kullanılıp denklemlerin ortak çözümleri ile hesaplanmaktadır [Erbil,2006].

Çizelge 2.1. Van Oss-Good yönteminde kullanılan yüzey gerilimi bileşenlerinin çeşitli test sıvıları için kullanılan değerleri (mN/m) [Erbil, 2006].

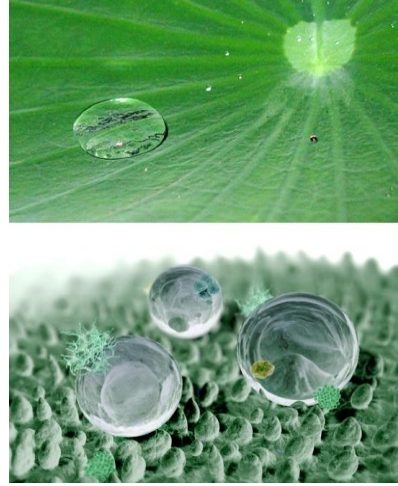
Sıvı	γ_{LV}	γ_{LV}^{LW}	γ_{LV}^{AB}	γ_{LV}^+	γ_{LV}^-
Su	72,8	21,8	51,0	25,5	25,5
Gliserol	64,0	34,0	30,0	3,9	57,4
Etilen Glikol	48,0	29,0	19,0	1,9	47,0
Formamit	58,0	39,5	19,0	2,3	39,6
Metilen iyodür	50,8	50,8	0	0	0
Dimetil sülfoksit	44,0	36,0	8,0	0,5	32,0
Kloroform	27,2	27,2	0	3,8	0
α-Bromonaftalen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

3. SÜPERHİDROFOBİK YÜZEYLER

3.1. Doğal Süperhidrofobik Yüzeyler

Temas açısı 150° ' den yüksek olan yüzeyler süperhidrofobik yüzeyler olarak adlandırılırlar. Süperhidrofobikliğin bilim dünyası ile tanışması, çamurlu ve kirli ortamlarda yapraklarının hep temiz olması ile bilinen nilüfer çiçeğinin yapraklarının incelenmesi ile başlamıştır. Nilüfer çiçeği yapraklarının kendini temizleme özeliğinden dolayı pek çok Asya kültüründe saflığın ve temizliğin sembolü olarak kabul edilir.

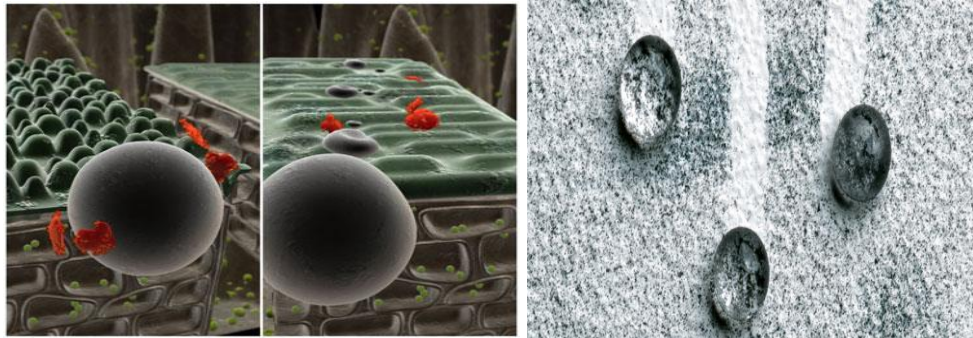
Son yıllarda taramalı elektron mikroskopunun (SEM) kullanımının yaygınlaşmasıyla, makroskopik olarak düzgün görünen bir yüzeyin mikroskobik ölçekte yüksek pürüzlülük içerdiği ortaya çıkmıştır. Mikro ve nano büyüklükteki hidrofobik balmumu kristallerini yüzeyinde bir arada bulunduran nilüfer yaprağı da bu yüzeylere örnektir.



Şekil 3.1. Nilüfer çiçeği yaprağı üzerindeki su damlası görüntüleri (conservationreport.com/tag/nature/).

Nilüfer çiçeği yaprağı, bazı böceklerin yüzeyleri, kelebek kanadı, su örümceğinin bacakları gibi birçok tür 150° ' den büyük su temas açısı veren bir yüzeye sahiptir. Bu yüzeyler ufak bir eğim verildiğinde su damlalarının yuvarlandığı ve yüzeydeki kirliliklerin uzaklaştırıldığı su iticiliğe sahiptir.

Nilüfer yaprağının herhangi bir cisim ile temas ettirilmesi halinde yüzeyindeki temas alanını minimize eden çok sayıda mikro ve nano büyüklükteki balmumu kristalleri ile örtülmüştür. Bu pürüzlerin arası ise hava paketçikleri ile doludur. Balmumu kristallerinin zor ıslanabilir olmasından ve çok sayıda hava paketçiklerinin varlığından dolayı yüzeydeki su damlaları küresel haldedir, çünkü belli bir hacim için en küçük yüzey alanına sahip geometrik cisim küredir. Ayrıca yüzeydeki kirler, genellikle yaprakların pürüzlü yapısından büyük olduklarından yüzeyde tutunamazlar. Su damlası kirlilik üzerinde yuvarlanırken, parçacık hidrofobik olduğundan, absorpsiyon sırasında enerji kazanılır. Su damlasına absorpsiyonla kazanılan enerji eğer parçacığın yapraktan taşınmasına mal olan enerjiden daha büyük ise parçacık yüzeyden taşınır. Bu yüzeyler bu yüzden yapışmama, kirletmeme ve kendi kendini temizleme gibi üstün özelliklere sahiptirler.



Şekil 3.2. Eğim ile yüzeydeki kirliliğin uzaklaştırılmasına ait örnekler (movingscience.de/uploads/pics/tech_lotuseffekt4.jpg, www. asknature. org/ media /image/402).

Bu özellikler antenlerin ve camların karlanması engelleyici, kendi kendini temizleyen trafik ışıkları, gemiler için biyo-kirliliğe karşı kaplamalar, otomobiller için kendi kendini temizleyen camlar, metal saflaştırma, leke tutmayan kumaşlar gibi birçok uygulama alanlarına sahiptirler [Erbil, 2003].

3.2. Yapay Süperhidrofobik Yüzeyler

Nilüfer yaprağının yüzeyinde kirlilik oluşmaması, kendi kendini temizleme özelliğinin oluşu süperhidrofobik yüzeylerin yapay olarak üretimine yol açmıştır. Süperhidrofobik yüzeylerin hazırlanışı ile ilgili araştırma ve geliştirme çalışmaları hızla artmaktadır. Son yıllarda bu konuya dair oldukça makale yayınlanmıştır.

Süperhidrofobik yüzeylerin elde edilmesi için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yüzeylerin sentezinde uygulanan metotların çoğu, mekanik ve kimyasal oyma gibi hidrofobik yüzeyin pürüzlülüğünü değiştiren işlemlerdir. Süperhidrofobik yüzeyler derin reaktif iyon aşındırma [Yang, 2010], fotolitografi yöntemi ile şekillendirilmiş silikon [Shibuichi, 1996; Bica, 1999; Richard, 1999; Chen, 1999] yüzey pürüzlülüğü artırılmış polimer [Tadnaga, 1997], PTFE ince filmlerinin vakum deposyonu, plazma polimerizasyonu, sol-jel gözenekli malzemelerinin uyarlaması, wax kristallendirilmesi, electrochemical etching veya deposition ve litografi yöntemleri gibi yöntemler ile elde edilebilmektedir [Nakajima, 2001; Li, 2007; Feng, 2002]. Süperhidrofobik yüzeylerin elde edilmesi, yüzeyde kimyasal heterojenlik sağlanarak da gerçekleştirilebilmektedir.

Katı yüzeyin pürüzlendirilmesiyle süperhidrofobik yüzeyin elde edilişi Erbil et al., tarafından 2003 yılında çalışılmıştır. Bu çalışmada polipropilen kullanarak süperhidrofobik kaplama oluşturmak üzere, birçok yüzeye uygulanabilen basit ve pahalı olmayan bir yöntem geliştirilmiştir. Polimer konsantrasyonunun ve film oluşturma sıcaklığının homojenlik, yüzey pürüzlülüğü ve suyun temas açısı üzerine etkisi araştırılmıştır. Polimer çözeltisinin konsantrasyonunun artırılması, kaplama kalınlığını ve yüzey pürüzlülüğünü arttırmıştır. Bu, süperhidrofobik yüzeyler oluşturmak için ucuz malzemelerin kullanılabilmesini göstermektedir. Temas açısı düzgün polipropilen yüzeyinde 40 mg/ml kaplama çözeltisi kullanıldığında 104 °C' den 149 °C' a yükselmiştir. Bununla birlikte, kaplama boyunca oluşan kırıklar, kaplamanın homojen olmadığını göstermektedir. Kurutma sıcaklığı da homojenliğin değişmesinde ayrıca etkilidir. Düşük kurutma sıcaklığında, çözücü buharlaşma hızı yavaştır ve çekirdeklenme süresi artınca daha yüksek kristaliniteye ulaşılır. Fakat düşük kurutma sıcaklığı çekirdeklenme hızını artırmaktadır. Bunların dışında düşük

kurutma sıcaklığı yüksek yüzey pürüzlülüğü ve temas açlarına sahip homojen olmayan kaplamalar vermektedir. Kötü çözücü olarak metil etil keton (MEK), sikloheksanon ve izopropil alkol kullanılmıştır. Bunların arasında MEK en iyi homojenliği ve en büyük temas açısını (160 °C) vermektedir. Polipropilen üzerinde temas açısı ölçümü yaparak, yüzey pürüzlülüğünün temas açısını artırdığı gösterilmiştir. Bu çalışmada düz polipropilen yüzey üzerinde 104° olan temas açısı, pürüzlü yüzeyde 160°'ye kadar artmıştır [Erbil, 2003].

3.2.1. Derin Reaktif İyon Aşındırma (DRIE)

Derin Reaktif İyon Aşındırma yüksek oranlarda derinlik, waferlarda (alttaşlarda) oyuk oluşturulması için kullanılan oldukça anizotropik aşındırma işlemidir. Bu özellikler mikroelektromekanik sistemlerde (MEMS) gerekli olduğu için geliştirilmiştir, fakat birçok teknolojiye kullanılmaktadır.

Yüksek oran derin reaktif iyon aşındırma için iki teknoloji vardır. Bunlar, kriyojenik ve Bosch prosesleridir. Bosch prosesi üretim tekniği açısından kabul gören prostestir. Hem Bosch hem de kriyo prosesleri 90° (dikey) duvar üretebilmesine rağmen çoğunlukla duvarlar 88° veya 92° gibi az miktarda konikleşmiştir.

Bir diğer mekanizma ise yan duvar pasifleştirilmesidir. Bu mekanizmada SiO_xF_y fonksiyonel grupları (sülfür hegzaförür ve oksijenden oluşan aşındırma gazları) yan duvarlar üzerine yoğunlaşırlar ve yoğunlaştıkları kısımları aşındırmadan korurlar. Bu proseslerin kombinasyonu ile derin dikey özellikler yapılabilmektedir.

Kriyo-DRIE' de, alttaş -110 °C (163 K)' e soğutulur. Düşük sıcaklık izotropik aşındırmayı üreten kimyasal reaksiyonu yavaşlatır. Her nasılsa iyonlar yüzeylerin en üst kısmına doğru iyonlar bombardıman etmeye devam eder ve o kısımları aşındırır. Bu proses oldukça yüksek dikeylikte çukurlar üretirler.

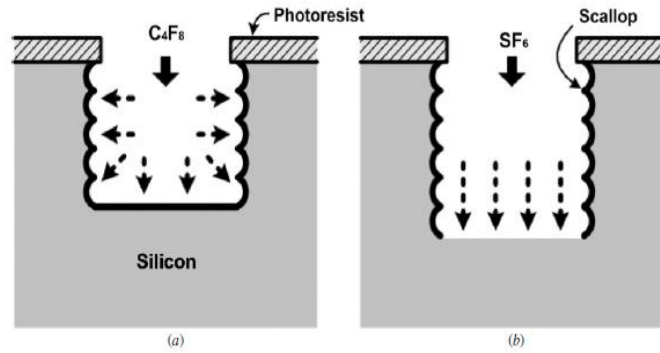
Bosch prosesi dikey hale yakın bir özellik elde etmek için birbirini takip eden iki moddan oluşmaktadır.

1. İzotropiğe yakın plazma aşındırma standardı. Plazma dikey yöne yakın bir altaştan nüfuz eden bazı iyonlar içerir. (Silikon için, çoğunlukla sülfür hegzaförür SF_6 kullanılır.)

2. Kimyasal olarak inert pasifleştirme tabakasının depozisyonu.

Öncelikle çukurlarda pasifleştirme tabakası oluşturulmaktadır ve genellikle bu tabakanın oluşumu için C_4F_8 gazı gönderilmektedir. Pasifleştirme tabakası tüm substratı kimyasal nüfuzdan ve aşındırmadan korumaktadır. Aşındırma süresince substrata bombardıman eden yönlendirilmiş iyonlar pasifleştirme tabakasına çukurun altından nüfuz ederler. İyonlar pasifleştirme tabakası ile çarpışır ve substratı kimyasal aşındırıcıya maruz bırakarak nüfuz ettiği bölgeyi bulunduğu yerden saçarlar. Her faz birkaç saniye içerisinde sonlanır.

Bu aşındırma/deposit basamakları çok küçük izotropik aşındırma basamaklarının sadece aşınmış çukurların altında gerçekleşmesi sonucunda çok defa tekrarlanır.



Şekil 3.3. DRIE'nin şematik gösterimi a) Pasifleştirme tabakasının oluşumu b) Çukurun en alt kısmına SF_6 'nın nüfuz etmesiyle aşınması [Kang, 2008].

4. BUHARLAŞMA ve YOĞUNLAŞMA

4.1. Saf Madde ve Saf Maddenin Fazları

Saf madde, her noktasında aynı ve değişmeyen bir kimyasal bileşime sahip olan maddeye denir. Su, azot, helyum, karbondioksit birer saf maddedir.

Saf maddenin sadece bir tek kimyasal element veya bileşimden oluşması gerekmez. Değişik kimyasal elementlerden veya bileşenlerden oluşan bir karışım da düzgün dağılımlı olduğu sürece saf madde tanımına uymaktadır. Örnek olarak hava değişik gazlardan oluşan bir karışımdır, kimyasal bileşimi her noktada aynı ve değişmez olduğu için saf maddedir. Buna karşılık su ve yağ karışımı saf madde değildir, çünkü böyle bir karışımda yağ suda çözünmediğinden kimyasal olarak birbirinden farklı iki ayrı bölge oluşmaktadır.

Faz, fiziksel olarak belirgin sınırların içinde her noktada aynı olan belirli molekül düzenini simgelemektedir [Çengel and Boles, 1998]. Saf bir maddenin kimyasal bileşiminin ve fiziksel halinin her noktasında aynı olduğu bölge o maddenin fazıdır [Atkins, 1998]. Temelde katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç faz vardır. Fakat her temel faz içinde farklı molekül düzenine sahip başka fazlar da olabilir. Örnek olarak karbon, katı fazı içinde grafit veya elmas fazlarında bulunabilir. Helyumun iki sıvı fazı, demirin ise üç katı fazı vardır. Yüksek basınçlarda ise buz yedi değişik fazda bulunabilir.

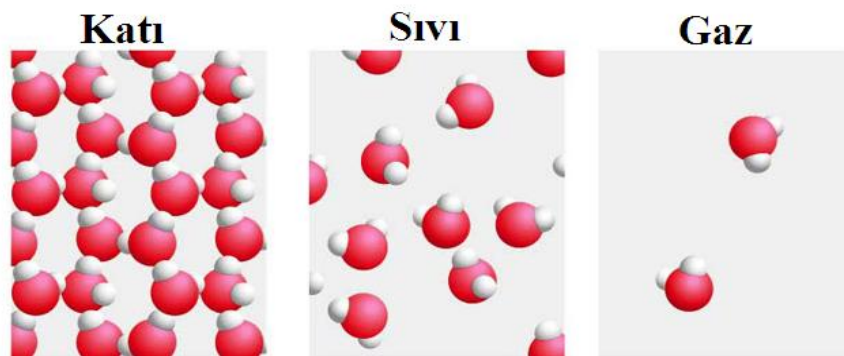
Moleküller arasındaki en kuvvetli bağlar katılarda, en zayıf bağlar ise gazlardadır. Bunun nedeni katı faz içinde moleküllerin daha sık kümelenmeleri, gazlarda ise moleküllerin aralarında büyük boşlukların bulunmasıdır.

Katı fazında moleküller latis adı verilen ve kendini tekrarlayan üç boyutlu bir düzende yer alırlar. Katı cisim içindeki moleküller birbirlerine yakın olduklarından, onları birbirine çeken kuvvetler güçlüdür ve bu nedenle moleküller yerlerinde sabit

kalırlar. Molekülleri birbirine çeken kuvvetler moleküller arasındaki uzaklık sıfıra yaklaştıkça itici kuvvetlere dönüşürler, bu nedenle moleküllerin birbiri üzerine yığılması söz konusu olmaz. Moleküller yerlerinde kalsalar bile buldukları yerde sürekli titreşirler. Bu titreşim sırasında moleküllerin hızları sıcaklığa bağlıdır. Sıcaklık yeterince arttığı zaman moleküllerin hızları ve dolayısıyla momentumları bir arada tutan kuvvetlere üstünlük sağlar ve molekül kümeleri ayrılmaya başlar.

Sıvı fazında moleküller arasındaki mesafe katı fazına oranla çok fazla değildir, fakat moleküller artık yerlerinde sabit kalmak yerine kümeler halinde birbirlerinin üzerinden kayarlar. Bununla birlikte, her küme içindeki yapısal düzen bozulmaz ve moleküller birbirlerine göre yerlerini korurlar. Moleküller arasındaki mesafe madde katıdan sıvıya dönüşürken biraz artar, bunun tersi çok az madde için geçerlidir, su bu maddelerden biridir.

Gaz fazında moleküller birbirlerinden iyice uzaklaşmışlardır ve yapısal bir düzenden söz edilemez. Gaz molekülleri rastgele bir hareket içindedir ve sürekli olarak birbirleriyle ve içinde buldukları kabın cidarlarıyla çarpışırlar. Özellikle düşük yoğunluklarda, moleküller arasındaki kuvvetler çok küçüktür ve moleküller arasındaki çarpışmalar tek etkileşim yoludur. Gaz fazındaki moleküllerin enerji düzeyleri sıvı ve katı fazındakilere oranla oldukça yüksektir [Çengel ve Boles, 1998].



Şekil 4.1. Katı, sıvı ve gaz fazlarının şematik gösterimi
(www.bio.miami.edu/~cmallery/150/chemistry/sf2x10b.jpg).

4.2. Faz Diyagramları

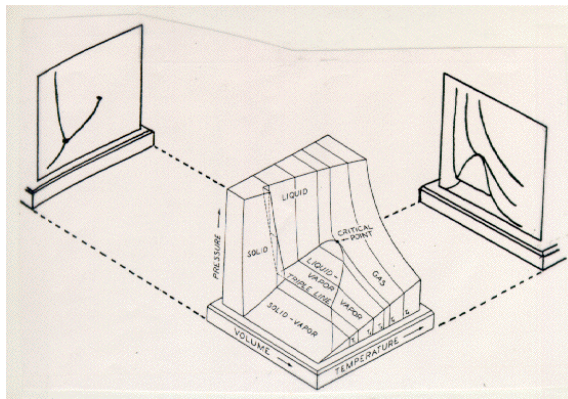
Bir ya da daha fazla bileşenden oluşan sistemlerdeki fazların bulunduğu bölgeleri belli sınırlarla belirleyen grafiklere denir.

4.2.1. V-T-p Faz Diyagramı

Hal değişkenlerine bağlı olarak bir sistemdeki fazların sınırlarını gösteren her grafiğe faz diyagramı denir. Saf bir maddenin hacmi madde miktarı yanında sıcaklık ve basınca da bağlıdır.

Molar hacmin ya da özgül hacmin sıcaklık ve basınca bağlılığını gösteren bir grafiğe V-T-p konları kullanıldığından dolayı üç boyutlu faz diyagramı adı verilir. Üç boyutlu faz diyagramınının p-V ve p-T düzlemleri üzerindeki izdüşümleri çizilerek iki boyutlu faz diyagramlarına geçilmiştir. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı p-T faz diyagramıdır.

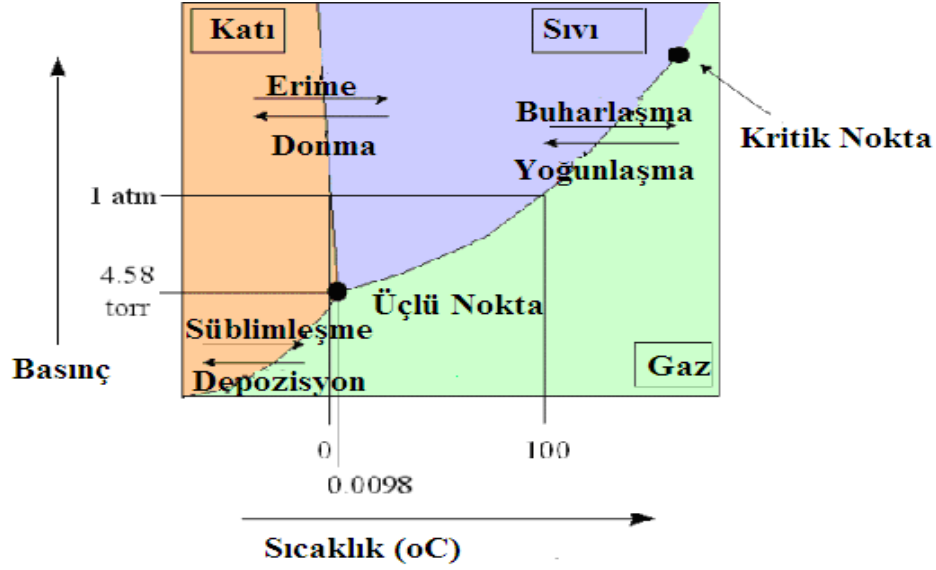
Donarken hacmi genişleyen maddelere ait üç boyutlu faz diyagramı Şekil. 4.2' de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Donduğunda hacmi genişleyen bir maddenin üç boyutlu faz diyagramı (www.geology.iastate.edu/gccourse/hydro/aspects/images/diagram.gif).

4.2.1.1. p-T Faz Diyagramı

Bir maddenin p-T faz diyagramı maddenin çeşitli fazlarının termodinamik açıdan kararlı olduğu basınç ve sıcaklık bölgelerini göstermektedir. Bu faz diyagramında her üç faz birbirinden bir eğri ile ayrılmıştır. Faz diyagramı Şekil 4.3'de görülmektedir.



Şekil 4.3. Su için Basınç-Sıcaklık Faz diyagramı (bhs.smuhsd.org/science-dept/marcan/apchemistry/h2ophase.gif).

Şekilde katı fazından doğrudan gaz fazına, gaz fazından da doğrudan katı fazına geçilen süblimleşme-depozisyon eğrisi, sıvı fazdan doğrudan gaz fazına ve gaz fazından sıvı fazına geçilen buharlaşma-yoğunlaşma eğrisi, donduğunda hacmi artan maddeler için katı fazından sıvı fazına ve sıvı fazından katı fazına geçilen erime - donma eğrisini bulandıran basınç-sıcaklık faz diyagramı görülmektedir

Buharlaşma ve yoğunlaşma birer hal değişim olayıdır. Buharlaşma belirli sıcaklıktaki sıvının sıcaklığının artması ile buhar fazına geçmesi ile gerçekleşirken, yoğunlaşma belirli sıcaklıktaki buharın sıcaklığının düşüşü ile sıvı faza geçmesi ile gerçekleşmektedir [Atkins, 1998].

4.3. Buharlaşma

4.3.1. Atmosferik ve Kuru Hava

Hava, renksiz, kokusuz, tatsız bir gazdır. Hava tek başına bir gaz olmayıp çeşitli gazların karışımından oluşmaktadır. Hava içerisindeki ana bileşenler azot (N_2) ve Oksijen (O_2) dir. Ortalama molekül ağırlığı 28,966 g/mol olan kuru havanın içinde bulunan başlıca gazlar, karışım içindeki mol oranına göre tablodaki gibidir:

Çizelge.4.1. Kuru havanın özellikleri.

Bileşen	Simge	Karışım Oranı (mol/mol)
Azot	N_2	0.78
Oksijen	O_2	0.21
Argon	Ar	0.0093
Karbon dioksit	CO_2	365×10^{-6}
Neon	Ne	18×10^{-6}
Ozon	O_3	$0.01-10 \times 10^{-6}$
Helyum	He	5.2×10^{-6}
Metan	CH_4	1.7×10^{-6}
Kripton	Kr	1.1×10^{-6}
Hidrojen	H_2	500×10^{-9}
Azot oksit	N_2O	320×10^{-9}

Havadaki gazlar belirli yöntemlerle birbirinden ayrılabilir. Örneğin su tutucu sülfürik asit çözeltisi veya fosfor pentoksit gibi maddelerden geçirilen hava içinde su buharı kalmaz. Eğer, hava kireç suyu veya sudlu kireçten geçirilirse içindeki karbondioksit tümüyle tutulur. Su buharsız ve karbondioksitsiz havanın içinde bulunan azot, oksijen ve diğer asal gazlar damıtma ile birbirinden ayrılarak ayrı ayrı amaçlar için kullanılırlar [Erdik, 2002].

Su buharı içermeyen hava “kuru hava” diye adlandırılmaktadır. Atmosferdeki hava bir miktar su buharı içerir ve bu nedenle “atmosferik hava” diye nitelendirilir.

Havayı su buharıyla kuru havanın bir karışımı olarak ele almak çoğu kere uygun olur. Hava - su buharı karışımına “nemli hava” denir. Havanın içerdiği su buharına “nem” denir. Kuru havanın bileşimi bağıl olarak sabit kalırken, su buharının miktarı denizlerden, göllerden, duşlardan ve hatta insan vücudundan olan buharlaşma ve yoğunlaşma sonucu değişir. Hava, sıcaklığa bağlı olarak belirli bir miktarda buharı bünyesinde tutabilir. Hava içindeki su buharı miktarı çevre şartlarına ve meteorolojik faktörlere bağlı olarak değişir. Su her sıcaklıkta buharlaşabildiği için havada her zaman su buharı bulunur [Çengel ve Boles, 1998].

Nemli havanın özelliklerinin incelenmesi “psikrometri” adı verilen termodinamiğin özel bir dalının konusu olmaktadır. Hava nemin ifade edilebilmesi için; buhar basıncı, mutlak nem ve bağıl nem terimleri kullanılır.

4.3.1.1. Su Buharı Buhar Basıncı

Havadaki su buharının “ideal gaz” olarak kabul edilmesi çok büyük kolaylık sağlar. Hatta bunun için hassaslıktan bir miktar ödün verilmesi bile göze alınabilir. 50 °C sıcaklıkta, suyun doyma basıncı 12,3 kPa’dır. Bu değerden daha düşük basınçlarda, doymuş buhar halinde olsa bile su buharı çok az bir hatayla (% 0.2’nin altında) ideal gaz olarak ele alınabilir. Bu bakımdan, havadaki su buharı, diğer karışımın başka bir deyişle kuru havanın varlığından etkilenmez ve ideal gaz hal denklemini sağlar. Böylelikle atmosferik hava, basıncı kuru havanın (P_a) ve su buharının (P_v) kısmi basınçlarının toplamı olan, ideal bir gaz karışımı olarak incelenebilir:

$$P = P_a + P_v \quad (\text{kPa}) \quad (4.1)$$

P : Toplam basınç, P_a : Kuru havanın kısmi basıncı, P_v : Su buharının kısmi basıncı’dır.

Su buharının kısmi basıncı genellikle “buhar basıncı” diye nitelenir. Bu basınç, su buharının atmosferik hava sıcaklığı ve hacminde tek başına olması durumunda

sahip olacağı basıncı göstermektedir. Doymun durumda bulunan havadaki su buharının yaptığı basınca “doymuş buhar basıncı” (P_{vs}) denir. “ P_g ” ile de simgelenmektedir. Doymuş buhar basıncı hava kütesinin sıcaklığı ile doğrudan ilgilidir [Çengel ve Boles, 1998].

4.3.1.2. Bağlı Nem ve Mutlak Nem

Havadaki su buharı miktarı değişik biçimlerde belirtilebilir. Herhangi bir sıcaklıkta havanın 1 m^3 ünde bulunan su buharı kütesine “mutlak veya özgül nem” denmektedir. Bunun en doğrudan yolu bir birim kuru hava kütesinde bulunan su buharı kütesini belirtmektir ve kg su buharının (m_v) kg kuru havaya (m_a) oranı olarak hesaplanır. “ w ” ile simgelenmektedir.

$$w = \frac{m_v}{m_a} \quad (4.2)$$

Mutlak nem ayrıca kuru hava ve su buharının kısmi basınçları ve moleköl ağırlıkları cinsinden de yazılabilir.

$$m_v = \frac{P_v V}{R_v T} = \frac{P_v V M_v}{\bar{R} T} \quad (4.3)$$

$$m_a = \frac{P_a V}{R_a T} = \frac{P_a V M_a}{\bar{R} T} \quad (4.4)$$

$$w = \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} = \frac{R_a P_v}{R_v P_a} = \frac{M_v P_v}{M_a P_a} \quad (4.5)$$

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

$$w = 0,622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (4.6)$$

Bağıl nem herhangi bir sıcaklıkta belli hacimdeki havadaki su buharı miktarının (m_v), aynı sıcaklıktaki havada bulunabilecek en fazla su buharı miktarına (m_g) oranıyla ilgilidir. % ile tanımlanır. Φ ile simgelendiği gibi İngilizce relative humidity nin baş harfleri olan “RH” ile de simgelenmektedir.

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{P_v V / (R_v T)}{P_g V / (R_v T)} = \frac{P_v}{P_g} \quad (4.7)$$

P_g , doyumluk basıncıdır.

(4.6) ve (4.7)' nin birleştirilmesi ile,

$$\phi = \frac{wP}{(0,622 + w)P_g} \quad (4.8)$$

bağıl nem ifade edilebilmektedir.

Bağıl nem havadaki nemin mutlak miktarını göstermez. Havanın neme ne oranda doymuş olduğunu gösterir. Bağıl nem, herhangi bir sıcaklıkta havanın buharlaşma ile yoğunlaşmanın ne kadar dengede olduğunu gösterir. Diğer bir deyişle havanın denge buhar basıncına olan uzaklığı veya yakınlığı hakkında fikir verir. Bağıl nem 100% olduğunda su, buharıyla dinamik dengede demektir. 80% bağıl nem ise, havanın doymuş hale gelebilmesi için gerekli su buharının 80% 'ini içeriyor demektir.

Sıcaklığın artışı bağıl nem azaltmaktadır. Bunun nedeni ısınan havanın hacmi genişleyerek ve alabileceği nemin artmasıdır. Sıcaklığın azalışı, havanın hacmini daraltmakta ve böylelikle alabileceği nemi azaltmaktadır. Böylece havanın nem açığı azalmakta yani bağıl nemi arttırmaktadır [Erdik, 2002; Çengel and Boles, 1998].

4.3.1.3. Çiğlenme Noktası Sıcaklığı

Nemli bir iklimde yaşayanlar, yazın sabahları uyandıklarında çimenin ıslak olduğunu görürler. Gece yağmur yağmamasına karşın, çimenin ıslak olması neye bağlanabilir? Bunun nedeni havadaki nemin soğuk yüzeyler üzerinde yoğunlaşması ve çiğ adı verilen su damlacıklarını oluşturmasıdır. Yaz mevsiminde gündüzleri büyük miktarlarda buharlaşma olur. Akşamları sıcaklık düşerken, havanın “nem tutma kapasitesi”, başka bir deyişle taşıyabileceği en fazla su buharı miktarı da azalır (Bu zaman içerisinde havanın bağıl nemi nasıl değişir?). Bir süre sonra havanın nem tutma kapasitesi, havadaki su buharı miktarına eşit olur. Bu noktada hava doymuş haldedir ve bağıl nemi 100%'dür. Sıcaklığın bir miktar düşmesi su buharının bir bölümünün yoğunlaşmasına neden olur ve böylelikle çiğ oluşumu başlar [Çengel ve Boles, 1998].

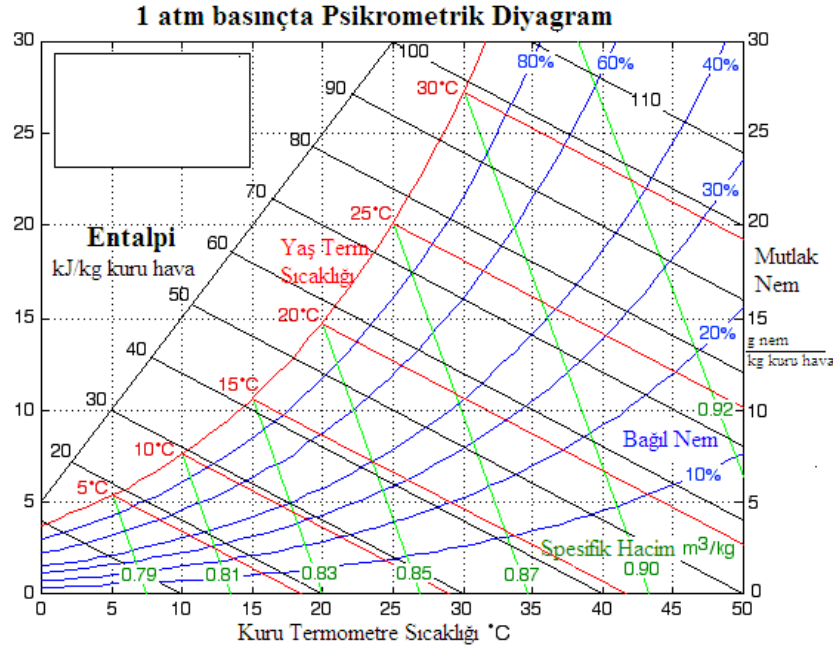
Çiğ noktası sıcaklığı $T_{\text{çn}}$, hava sabit basınçta soğutulduğunda yoğunlaşmanın başladığı sıcaklık diye tanımlanır. Başka bir deyişle, $T_{\text{çn}}$ suyun söz konusu buhar basıncındaki doyma sıcaklığıdır. Bağıl nemi belirlemenin yollarından biri de, havanın çiğ noktası sıcaklığını bulmaktır. Çiğ noktası sıcaklığı bulunduğunda, buhar basıncı (P_v) ve buna bağlı olarak bağıl nem hesaplanabilir. Bu yaklaşım basittir, fakat pratik değildir. Çiğ noktası sıcaklığı, hava sabit basınçta soğutulduğu zaman yoğunlaşmanın başladığı sıcaklık olarak belirlenir. Diğer bir deyişle, çiğ noktası sıcaklığı suyun buhar basıncındaki doyma sıcaklığıdır [Çengel and Boles, 1998].

Başka bir ifade ile çiğ noktası sıcaklığı veya çiğlenme sıcaklığı, bir gaz içinde bulunan nemin içinde bulunduğu veya etrafında bulunduğu cisimlerin yüzeyinde yoğunlaşarak su (sıvı) durumuna geçmeye başladığı sıcaklık derecesidir.

4.3.1.3.1. Çiğlenme noktası sıcaklığının psikrometrik diyagram yardımı ile belirlenmesi

Çiğlenme noktası sıcaklığının belirlenmesi için psikrometrik diyagramlardan yararlanılmaktadır.

Atmosferik havanın belirli basınçta iki bağımsız şiddet özelliği tarafından kesin olarak hesaplanabilmektedir. Belirli basınçlarda atmosferik havanın, bağıl nem özgül hacim, entalpi, kuru ve yaş termometre sıcaklıklarına ait veriler hesaplanıp belirlenmiş olup diyagramlar haline getirilmiştir. Bu diyagramlar psikrometrik diyagramlar olarak bilinmektedir. 1 atm toplam basınca dair hazırlanmış örnek bir psikrometrik diyagram Şekil 4.4' de gösterilmiştir.

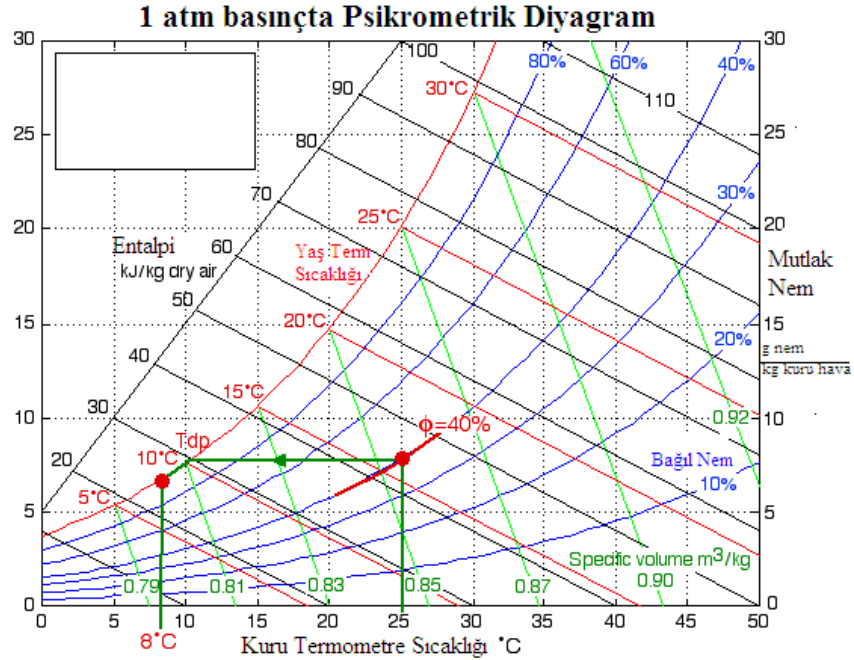


Şekil.4.4. Psikrometrik Diyagram

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

Psikrometrik diyagramda, spesifik hacme, bağıl neme, entalpiye ait veriler görülmektedir. Diyagramın y ekseninde gram nem / kg kuru hava cinsinden mutlak neme, x eksenini ise kuru termometre sıcaklığına ait verileri bulundurmaktadır.

Sıcaklık ve bağıl nem değerlerinin bilindiği durum için çığlenme noktası sıcaklığının bulunuşu şematik olarak Şekil.4.5' de gösterilmiştir.



Şekil.4.5. Çığlenme noktası sıcaklığının psikrometrik diyagram yardımı ile bulunuşu
(www.ent.ohiou.edu/~thermo/Applied/Chapt.7_11/Psychro_chart/psych_foggy).

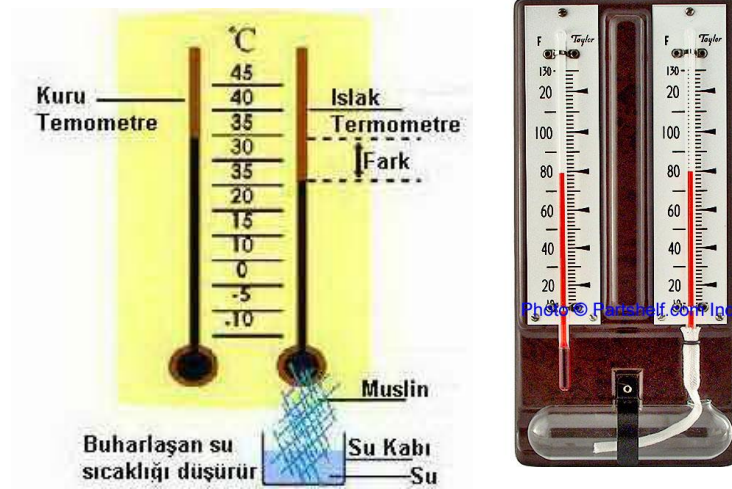
Sıcaklığın 25 °C, bağıl nemin 40% mutlak nemin de 7 olduğu durum için öncelikle sıcaklık ve bağıl neme ait değerlerine ait kesişim noktaları diyagram üzerinde işaretlenir. X eksenine yatay bir şekilde 100% bağıl nem değerine sahip olan doyma eğrisine kadar bir doğru çizilir. Çizilen doğrunun 100% doyma 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 durum için çığlenme noktası sıcaklığıdır. 25 °C, 40% ve mutlak değeri 7 olan su buharının çığlenme noktası sıcaklığı 8 °C' dir.

4.3.1.4. Hava Neminin Ölçüm Metotları

Nem ölçen aletlere "higrometre" veya "psikrometre" denir. Aşağıda havanın bağıl nemini ölçmek için kullanılan bazı yöntemler anlatılmaktadır.

4.3.1.4.1. Kuru - Yaş termometre metodu

Bağıl nem değerinin belirlenmesi ve diyagramların oluşturulması amacı ile bir kuru hazneye bir yaş hazneye sahip iki adet cıva termometre kullanılan yöntemdir ve "kuru-yaş hazneli psikrometri" (wet and dry bulb psycrometer) şeklinde adlandırılmaktadır. Biri normal havaya açık ve diğeri sulu bir haznede damıtık suyla sürekli ıslak tutulan bir fitille kaplı iki ayrı termometreden oluşur. Buna göre kuru termometre ile nemli havanın sıcaklığı ölçülürken yaş termometre ile doyma anındaki sıcaklık ölçülmektedir.



Şekil 4.6. Kuru- yaş hazneli psikrometri

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

Havanın doyma olmadığı durumda, ıslak haznedeki fitilin suyu buharlaşır ve hava içine difüzyonlanır. Fitilde kalan suyun sıcaklığı, sudan havaya ısı iletimi olduğundan soğur, bu nedenle kuru- haznedeki sıcaklığın altına düşer.

Hava ve fitildeki su sıcaklıkları eşitlendiğinde ısı iletimi sona ermektedir, fakat hava su buharı ile doymamış ise buharlaşma devam etmektedir. Böylece suyun sıcaklığı buharlaşma varlığından dolayı havanın sıcaklığının altına düşmektedir. Bu halde havadan suya ısı iletimi başlar. Havadan nemli fitile ısı geçişi aralarında bir sıcaklık dengesi kuruluncaya kadar devam eder. Bu anda konveksiyonla iletilen ısı, fitilden suyun buharlaşması için gerekli gizli ısıya eşittir.

Denge durumunun oluştuğu andaki sıcaklık “Psikrometrik Yaş Termometre Sıcaklığı” (t_s) olarak adlandırılır ve atmosferik şartlara ve fitilin üstünden geçen gaz akış hızına bağlıdır. Bu sırada ölçülen denge sıcaklığı Yaş termometre sıcaklığı nemli fitil ve hava arasındaki kütle ve ısı transferi oranlarına dayanır. Üzerinden hava cereyanı geçirmek suretiyle su en fazla bu sıcaklığa kadar soğutulabilir. Hava su buharına doymamış hale geldiğinde ise ıslak fitilden su buharlaşması gerçekleşmez. Bu durumda $t_k = t_s$ dir.

Doymamış nemli hava için her durumda yaş termometre sıcaklığı, kuru termometre sıcaklığından daha düşük olup buharlaşma hızı havanın kuruluğuna bağlıdır. Buharlaşma hızı nem oranına ters orantılı bir şekilde değişmektedir. Nemin yüksek olduğu zaman buharlaşma oranı düşüktür ve iki termometre sıcaklıkları arasındaki fark da düşüktür.

Yaş ve kuru termometre sıcaklıklarına göre havanın bağıl nemi;

$$\Delta t = t_k - t_s \quad (4.9)$$

$$RH = \frac{P_{vs}(t_s) - \frac{1}{2} \Delta t}{P_{vs}(t_k)} \quad (4.10)$$

eşitlikleri yardımı ile hesaplanabilir. Ayrıca eşitliğin kullanılmasıyla özel çizelgeler hazırlanmıştır bu çizelgeler ile, kuru termometre sıcaklığı ile kuru ve yaş termometre

sıcaklıkları arasındaki farktan faydalanılarak ve basınç değerleri de dikkate alınarak bağıl nem saptanabilir [Bindon, 1965].

Kuru ve yaş termometre sıcaklık dereceleri biliniyorsa psikrometrik diyagramdan bağıl nem belirlenebilmektedir.

4.3.1.4.2. Çiğ noktası higrometresi

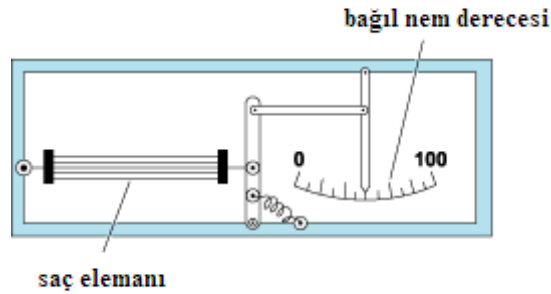
Bağıl nemi en doğru tayin etme yöntemi çiğ noktası sıcaklığını ölçmektir. Bağıl nemin havada bulunan su buharının kısmi basıncının (P_v), doymuş durumdaki havanın kısmi buhar basıncına (P_{vs}), oranı olduğu daha önceki kısımlarda belirtilmişti. Doymuş havanın kısmi buhar basıncı değişik sıcaklıklar için doymuş su buharının denge basıncını veren tablolardan kolayca bulunabilmektedir. Havada bulunan su buharı kısmi basıncının (P_v) bulunması ise daha zordur. Çiğ noktası higrometresi ile P_v değeri bulunmakta buradan da bağıl neme geçilmektedir [Drigo ve Alocco, 1955].

Açık renk bir yüzeyi yüzeyin bulunduğu ortamdaki su buharının yüzeyi soğutarak yüzey üzerine yoğunlaşmasını sağlanmaktadır. Nemin yüzey üzerinde oluşması ince bir buğu tabakası şeklinde oluşmaktadır. Yüzeyin matlaşması ile sıcaklık ölçülmektedir. Ölçülen sıcaklık değerine karşılık gelen buhar basıncı tablolardan bulunarak bağıl nem değeri (4.7) formülü ile elde edilir.

Çiğlenme noktası sıcaklığı ölçüldükten sonra aynı zamanda psikrometrik diyagram da bağıl nemi bulmak üzere kullanılabilir. Örneğin; bir hava örneği $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ de alınır, bir aynada $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ ye soğutulduğunda yoğunlaşmanın ilk işaretleri görülürse; grafik havanın 69% bağıl nem içerdiğini gösterir.

4.3.1.4.3. Saçlı higrometre

İnsan saçı teli bağıl neme bağlı olmak üzere uzar veya kısalır. Bu durumdan yola çıkılarak mekanik higrometre olarak da adlandırılan “saçlı higrometreler” tasarlanmıştır. Yağı alınmış birkaç saç teli iki destek arasında gerilmiştir. Saç tellerinin boyu havadaki nem miktarı ile orantılı olarak artar. Bu değişimler bir göstereyi hareket ettirmektedir. Göstergenin ucu kalibre edilmiş bölmeler karşısında durur ve buradan bağıl nem okunur. Duyarlığı azdır fakat yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.



Şekil.4.7. Saçlı higrometre (www.answers.com/topic/hygrometer).

4.3.1.4.4. Elektriksel direnç higrometre

Bazı materyaller etraftaki havanın oransal nemine göre yüzey elektrik rezistansında farklılık göstermektedir. Bu materyallere örnekler alüminyum oksit, fenol-formaldehit polimerleri ve stiren polimerleridir. Bölümlendirme yoluyla direnç, nem olarak okunabilmektedir.

4.3.1.5. Bağıl Nemin Sabitlenmesi

Ortamın bağıl nemi farklı konsantrasyonlardaki potasyum hidroksit, sülfürik asit ve doymuş tuz çözeltileri hazırlanarak sabitlenebilir. Doymuş tuz çözeltileri kullanılarak bağıl nemin sabitlenmesi hem daha ekonomik, hem de daha kolaydır.

Özel doymun tuz çözeltileri üstlerindeki alanın nemini hep aynı değerde tutarlar. Nem sadece sıcaklıktan etkilenir. Ortamın bağıl neminin ayarlanmasında diğere bir yöntem ise, kuru ve nemli havanın belli oranlarda karıştırılması veya belli bir doymunluk değeri gösteren gaz akımıyla sağlanmasıdır. İzotermal denge koşullarında doymun tuz çözeltileri üzerinde sabit nemin sağlanması ise bilimsel çalışmalarda en yaygın kullanılan metottur.

Katı maddeler su içerisinde çözüldüklerinde entropi düşmektedir. Böylece su moleküllerinin sıvı fazdan buhar fazına geçmesi güçleşir. Başka bir tanımlama ile buhar basıncı düşer. Buhar basıncının düşmesi sonucu donma noktası sıcaklığında azalma ve kaynama noktası sıcaklığında artma görülür. İdeal çözeltilerdeki konsantrasyonla buhar basıncı arasındaki ilişki Raoult yasası ile tanımlanır. Bu yasaya göre ideal çözeltilerde çözücünün buhar basıncının bağıl olarak azalması katı maddenin mol fraksiyonuna eşdeğere dir. (P) çözeltilinin, (P_o) da çözücünün buhar basıncı ve (n₁) katı maddenin ve (n₂) çözücünün mol sayısı kabul edilirse genel olarak Raoult yasası aşağıdaki gibi şekilde tanımlanır.

$$\frac{P}{P_o} = \frac{n_1}{n_1 + n_2} \quad (4.11)$$

Doymun bir tuz çözeltileri havayla temas halinde bırakıldığında havanın nemi katının yüzeyinde yoğunlaşır. Bu yoğunlaşma ortamın buhar basıncı doymun tuz çözeltilerinin buhar basıncının altına düşene kadar devam eder. Doymun tuz çözeltilerinin buhar basıncı saf suyun buhar basıncından daha düşüktür. Ve bu durumda doymun tuz çözeltilerinin yüzeyinde toplanan su ancak ortamın sıcaklığında doymun çözeltilerinin buhar basıncına uygun düşen bağıl nem değereinde buharlaşır.

Doymun tuz çözeltilerinin havadan suyu adsorplama eğilimi sabit sıcaklıkta dengede doymun çözeltilerinin buhar basıncıyla, suyun buhar basıncının oranına eşittir. Bu oran su aktivitesi olarak da tanımlanır. Başka bir ifade ile maddenin sabit sıcaklıkta dengeye erişmesinden sonra, madde tarafından tutulan su miktarıdır. Bu oranın yüzle çarpılması bize bağıl nemi verir. Doymun tuz çözeltilerinin buhar

basınçlarının bulunmasıyla bağıl neme direk olarak geçilebilir. Bazı doygun tuz çözeltilerinin buhar basınçları ve bağıl nemleri aşağıdaki tabloda verilmektedir.

Belirli bir sıcaklıkta uçucu olmayan herhangi bir maddenin sulu çözeltisi buhar fazı ile dengede olduğunda belirli bir su buharı basıncına sahip olacaktır. Böylece, çözeltiler üzerlerindeki atmosferin bağıl nemini sabit tutarlar. Suyun fazlası bir miktar katının çözeltiliye geçmesine sebep olur ve sudaki kayıp çözünmeyen katının çözünmesini sağlayarak bir denge kurulmuş olur. Katı üzerinde fazla sıvı kalmadığı zaman sıvı içine difüzyon çok yavaştır ve koşulları değişmeden kalacaktır. Böylelikle, buhar basıncını değiştirmeksizin önemli miktarda su kazanılıp kaybedilebilir.

Çizelge 4.2. Bazı doygun tuz çözeltilerinin farklı sıcaklıklardaki bağıl nem değerleri [Winston, 1960].

Doygun 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

4.4. Yoğunlaşma

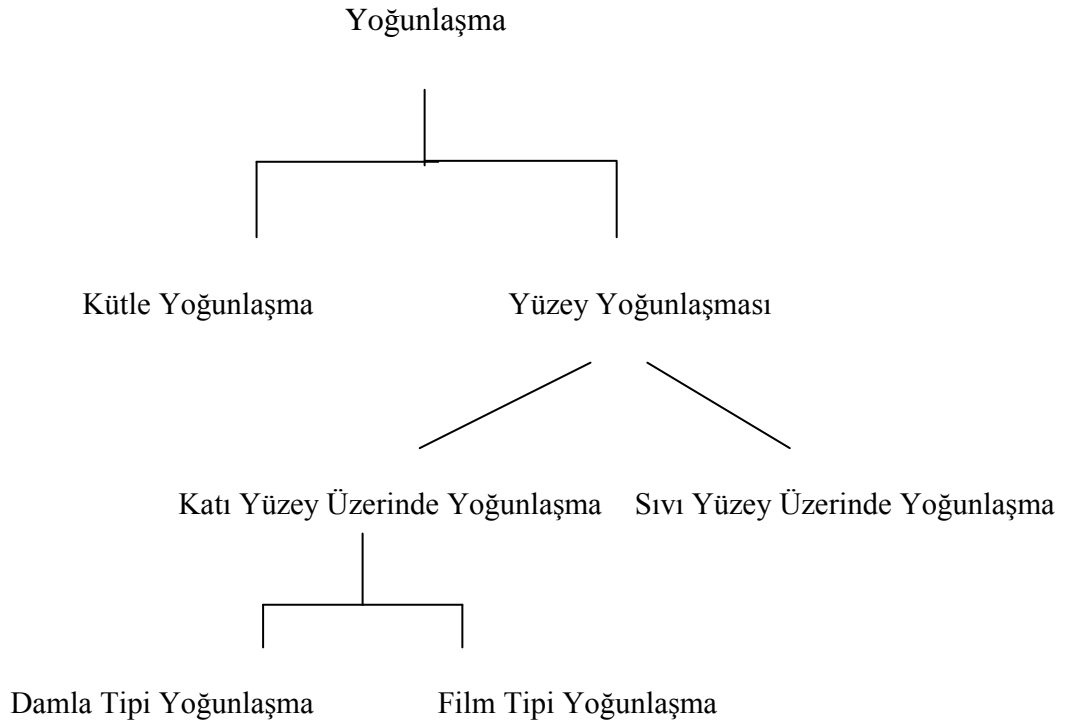
Yoğunlaşma, buharın basıncına bağlı olarak doyguluk sıcaklığından daha düşük sıcaklığa sahip olduğunda sıvı haline dönüştüğü bir faz değişim olayıdır. Yoğunlaşma çığlenme noktası sıcaklığının altında gerçekleşmektedir. Günlük yaşamda birçok yerde yoğunlaşma ile karşılaşılmaktadır. Yoğunlaşma ısı aktarımı açısından oldukça önemli bir olaydır ve dünyada otomotiv, kimyasal prosesler, havalandırma, güç üretimi ve birçok farklı endüstride kullanılmaktadır.

Faz değişim olayı süresince yoğunlaşma olan bölgede açığa çıkan latent ısı yoğunlaşmanın olduğu bölgeden konveksiyon, difüzyon veya radyasyon ile uzaklaştırılmalıdır. Yoğunlaşmanın olduğu bölgede bir basınç düşüşü meydana gelmektedir ve bunun sonucunda bu bölgeye kütle aktarımı gerçekleşmektedir. Yoğunlaşma olayını kütle ve ısı aktarımı birlikte tanımlamaktadır. Yoğunlaşma olayının başlangıcı tam olarak açıklanabilmiş değildir fakat bir buhar kütleminin içerisinde veya bir katı yüzey üzerinde bir grup buhar molekülünün bir çekirdek (oluşum merkezi) ile o başladığına inanılmaktadır.

Genel olarak yoğunlaşma olayı kütle yoğunlaşma ve yüzey yoğunlaşması şeklinde iki sınıfa ayrılmaktadır. Kütle yoğunlaşma, kütle buharının içerisinde buhar sıcaklığı doyguluk sıcaklığından daha düşük sıcaklıkta olduğu zaman gerçekleşebilmektedir. Bu olay homojen yoğunlaşma şeklinde de adlandırılmaktadır ve toz gibi yabancı partiküller ile kolaylaşmaktadır. Bu tip yoğunlaşma için verilebilecek en güzel örnek sis oluşumudur.

Yüzey yoğunlaşması buharın soğutulmuş bir yüzey üzerinde maruz bırakılması ile meydana gelmektedir. Bu tip yoğunlaşma verimli bir ısı aktarım işlemi sağlamaktadır ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Endüstride çok geniş bir uygulama alanına sahip olması nedeni ile mühendislik uygulamalarında en önemli yoğunlaşma çeşididir. Yüzey yoğunlaşması katı yüzey üzerinde yoğunlaşma ve sıvı yüzey üzerinde yoğunlaşma şeklinde iki gruba ayrılmaktadır. Katı yüzey yoğunlaşması katı bir yüzey üzerinde düşük sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Sıvı fazın katı yüzey üzerinde oluşumuna göre damla tipi yoğunlaşma ve film tipi

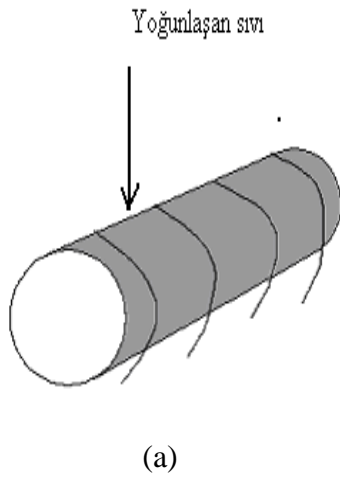
yoğunlaşma şeklinde ayrılabilir. Yoğunlaştığı yüzeyin özelliklerine bağlı olarak bu iki yoğunlaşma çeşidinden biri veya ikisi görülebilmektedir. Detaylı olarak bahsedilen yoğunlaşma çeşitleri şematik olarak Şekil 4.8’ de özetlenmiştir.



Şekil 4.8. Yoğunlaşma olayının sınıflandırılması.

4.4.1. Film Tipi Yoğunlaşma

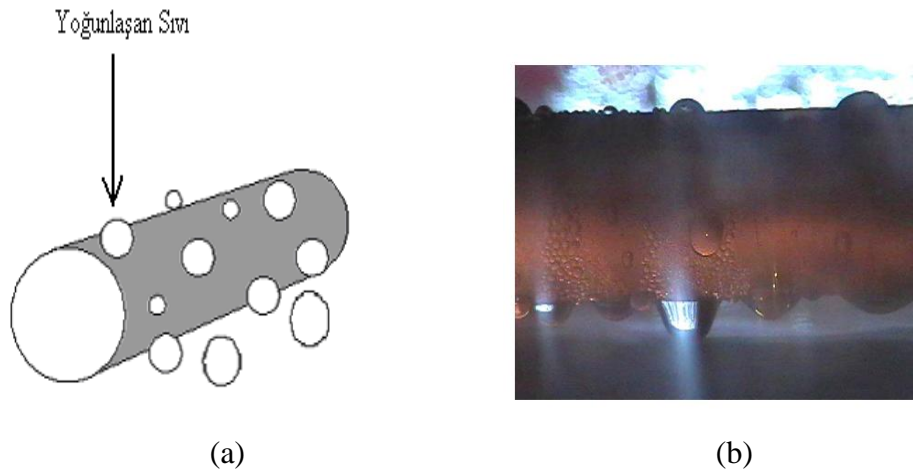
Film tipi yoğunlaşma soğuk bir yüzey ile buharın teması halinde sıvının yüzeyi tamamen ıslatması durumunda meydana gelmektedir. Film tipi yoğunlaşmada yoğunlaşan sıvı yüzey üzerinde sürekli bir film oluşturmaktadır. Bu film yerçekimi etkisi altında aşağıya doğru akmaktadır. Sıvı – buhar arayüzeyinde açığa çıkan latent ısı bir yoğuşturucuda, yoğunlaşan sıvı filmine ve sonra katının cidarına aktarılmaktadır ve son olarak yoğuşturucu içerisinde geçen soğutucu sıvı ile ayrılmaktadır. Film tipi yoğunlaşmanın yatay bir boru yüzeyinde meydana geldiği durumdaki şematik gösterimi ve görüntüsü Şekil 4.9’ da gösterilmektedir.



Şekil 4.9. Film tipi yoğunlaşmanın yatay bir boru yüzeyindeki (a) şematik gösterimi, (b) görüntüsü [Özler, 2007].

4.4.2. Damla Tipi Yoğunlaşma

Damla tipi yoğunlaşma, yoğunlaşan sıvının katının yüzeyini ıslatmadığı durumda ve yüzeyde sürekli bir film yerine çeşitli çaplarda damlalar oluşturması şeklinde meydana gelmektedir. Damla tipi yoğunlaşmanın şematik gösterimi ve görüntüsü Şekil 4.10'da görülmektedir.



Şekil 4.10. Damla tipi yoğunlaşmanın yatay bir boru yüzeyindeki (a) şematik gösterimi, (b) görüntüsü [Özler, 2007].

Damla tipi yoğunlaşmada herhangi bir sıvı filmi oluşmadığından ısı aktarımına direnç gösteren bir durum yoktur. Bu yüzden damla tipi yoğunlaşmadaki ısı aktarım katsayısı film tipi yoğunlaşmadaki ısı aktarım katsayısından oldukça büyüktür. Isı aktarım katsayısındaki büyüklüğün fazla olması nedeni ile ısı aktarım uygulamalarında damla tipi yoğunlaşma tercih edilmektedir. [Özler, 2007].

Vemuri et al., 99% saflıkta bakır yüzeyine n- oktadesilmerkaptanın kaplanması sonucunda denge temas açısı 150° olan yüzey elde etmiş olup bakır yüzeyinde ve n- oktadesilmerkaptan kaplı yüzey üzerinde yoğunlaşma denemesi gerçekleştirerek bakır yüzeyinde meydana gelen yoğunlaşmanın film tipi, n-oktadesilmerkaptan kaplı yüzey üzerinde meydana gelen yoğunlaşmanın ise damla tipi olduğunu

gözlemlemiştir. Yoğunlaşma sonucunda damla tipi yoğunlaşmanın meydana gelmesi ile ısı aktarım hızının film tipi yoğunlaşmaya oranla vakum koşullarında denemelerin gerçekleştirilmesi ile 3 kat, atmosferik koşullarda denemelerin gerçekleştirilmesi ile ise 8 kat artığı sonucuna varmışlardır [Vemuri, 2006].

Katı bir yüzey üzerinde meydana gelecek yoğunlaşmanın çeşidi yüzey özellikleri ile yakından ilgilidir. Bunun için katı yüzey üzerinde gerçekleşecek yoğunlaşmanın çeşidini önceden tahmin etmede temas açısı kullanılabilir. Ölçülen denge temas açısının atmosfere açık oda koşullarındaki değeri kütle aktarımının gerçekleştiği sistemlerde ısıtılabilirliğin belirlenmesinde kullanılabilmesi için pek de yararlı olmadığı düşünülmektedir. Bu nedenle 1994 yılından sonra yoğunlaşma için serbest yüzey enerjisi kriterini yoğunlaşma sıcaklığındaki yoğunlaşan sıvının ve yoğunlaşmanın gerçekleştiği katı yüzeyin serbest yüzey enerjisi arasındaki fark olarak tanımlamıştır.

$$\Delta\gamma = \gamma_1 - \gamma_s \quad (4.12)$$

γ_1 : Sıvının serbest yüzey enerjisi

γ_s : Katının serbest yüzey enerjisi

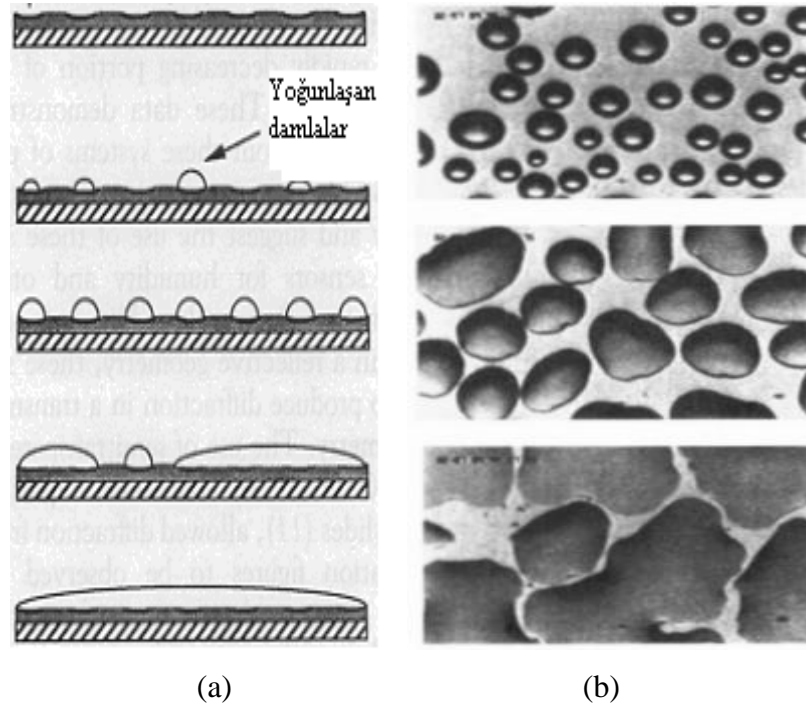
Bu fark sayesinde katı yüzey üzerinde meydana gelebilecek yoğunlaşma çeşidi hakkında fikir edinilebilmektedir.

Çizelge 4.3. Yoğunlaşma Çeşidi Kriteri [Ma, 2000].

Serbest Yüzey Enerjisi Farkı (mJ/m ²)	Temas Açısı Metodu	Yoğunlaşma Çeşidi
$\Delta\gamma \leq 0$	-	Film Tipi
$0 \leq \Delta\gamma < 33,3$	$0^\circ \leq \theta < 90^\circ$	Karışık
$\Delta\gamma \geq 33,3$	$\theta > 90^\circ$	Damla Tipi

Yüzeylerin yüzey özelliklerine bağlı olarak oluşan ve birleşen damlalar yarı küre şeklinde değildirlir. Bu yüzeyler genellikle serbest yüzey enerjileri yüksek, denge temas açıları düşük hidrofilik yüzeylerdir.

Hem hidrofил hem de hidrofob bölgeleri bulunduran yüzeyler üzerinde hidrofob bölgelerde damla oluşumu söz konusu iken, hidrofил bölgelerde film oluşum söz konusudur. Yüzey üzerinde yoğunlaşma devam ederken damlalar hidrofил kısımlarda oluşan film ile difüzyon ile birleşerek zamanla küresellikten sapmakta fakat buna rağmen küresel damlalar gibi büyüme kanuna uymaktadır [Kumar et al., 1994, Zhao and Beysens, 1995].



Şekil 4.11. Üzerinde hidrofил ve hidrofob bölgeler bulunduran yüzeylerde yoğunlaşmanın (a) Şematik gösterimi [Kumar and Whitesides, 1994], (b) Optik mikroskop görüntüsü [Zhao and Beysens, 1995].

Damla yoğunlaşmasının etkinleştirilmesi yoğunlaşan yüzeye veya kütle buharına uygun organik aktifleştirici kullanarak, metal organik bileşiklerin ince bir tabaksını kullanarak ve yoğunlaşmanın gerçekleşeceği yüzeyi düşük serbest yüzey enerjili bir polimer filmi ile kaplanarak sağlanabilmektedir [Ma, 2000].

Verimli bir damla yoğunlaşması gerçekleştirilmesi için yüzeyde oluşan damlanın yüzeyden oldukça hızlı ayrılması gerekmektedir, aksi takdirde oluşan damlalar birleşecek ve böylelikle ısı aktarımının engellenmesine neden olacaklardır. Hidrofob yüzeylerde damlaların yüzeyden ayrılabilmesi için dış kuvvete ihtiyaç söz konusu iken süperhidrofob yüzeylerde bu durum herhangi bir dış kuvvet gerektirmemektedir [Boreyko, 2009].

Hidrofobik, süperhidrofobik ve ultrahidrofobik yüzeyler üzerinde damla yoğunlaşması ile ilgili çalışmalar yer almaktadır.

Leach et al., poliviniliden klorür ve oktadesiltriklorosilan kaplanmış cam üzerinde su buharına belirli sürelerde maruz bırakarak yüzeyde damla yoğunlaşmasının oluşmasını sağlamış ve damlaların büyüme kinetiğini incelemişlerdir. Küçük damlaların yüzeye adsorplanan suyun, damlanın çevresine difüzyon ile büyüdüğü görmüşlerdir. Ayrıca birim substrat alanında küçük damlalar ile işgal edilen kısımlarda daha büyük damlaların olduğu kısımlardakinden yüksek bir yoğunlaşma hızı olduğu sonucuna varılmış ve ısı aktarım hızlarının yüzeyin küçük damlalar ile kaplanması ile artacağı düşünülmektedir [Leach, 2006].

Briscoe et al., polietilen filmi ve polietilen filminin ıslanabilirlik özelliklerinin artırılması ile elde edilen polietilen filmi üzerinde yoğunlaşmayı incelemişler ve işleme tabi tutulmayan polietilen filmi üzerinde oluşan damlanın küresel şekle oldukça yakın olduğunu gözlemlemişlerdir. Polietilen filminin Corona Discharge ile işleme tabi tutulması ile temas açısı daha düşük filmler elde edildiğinde ise yüzeyde oluşan damlaların şeklinin küresellikten uzaklaştığı ve yüzeyde film tipi yoğunlaşma meydana geldiği sonucuna varmışlardır [Briscoe, 2005].

Zhong et al., serbest yüzey enerjisi ve nanoözelliklerin 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 artırıcı 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 yapılı yüzeyin serbest yüzey enerjisi farkının nanoyapılı olmayan yüzeyden daha küçük, dolayısı ile de ısı aktarım katsayısının daha az olduğu sonucuna ulaşılmıştır [Zhong, 2010].

Narhe and Beysens, kare desenlerden oluşan pürüzlü silikon alttaş hidrofob yüzeyde damlaların büyümesini incelemiştir. Küçük damlalar desenler üzerinde ve desenler arasındaki boşluklarda oluşmuş, desenler üzerindeki damlalar daha hızlı bir şekilde büyümüş ve birleşerek desenler arası boşlukları doldurmuş olup desenler arasındaki boşluklar tamamen dolduğunda yüzey üzerinde damla büyümeye başlamıştır. Damla oluşumunun ilk aşamalarında hava – paket- gibi (air- pocket-like) Cassie-Baxter hali söz konusu iken, Wenzel penetrasyon rejiminde birkaç büyük damlanın oluşması ile yoğunlaşmanın sonlandığı sonucuna varılmıştır [Narhe and Beysens, 2007].

Narhe and Beysens, diğer çalışmalarında ucu sivri süperhidrofob yüzeylerde damlaların büyümesini incelemiştir. Damlaların sivri uçların tepesinde oluşmakta ve büyüyen damlaların boşlukları doldurmakta olduğunu, elde edilen büyük damlaların küçük damlalar ile çevrelendiğini gözlemlemiştir. Damlaların büyümesinin yüzeyin boşluklarının dolması nedeniyle düz bir yüzey üzerindeki gibi olduğunu ve denge temas açısının 164° den 111° ye düşerek ucu sivri süperhidrofob yüzeyler üzerinde yoğunlaşmanın süperhidrofob yüzey olma özelliğini korumadığı sonucuna ulaşmışlardır [Narhe and Beysens, 2006].

Chen et al., karbon nanotüplerinin kullanılması ile iki-katlı (two tier) pürüzlü süperhidrofob yüzeyler elde ederek bu yüzeyler üzerinde damla yoğunlaşmasını incelemiştir. Yapılan çalışmada yüzeyin yoğunlaşma süresinde Wenzel halinden daha kararlı olan Cassie halini tercih ettiğini ve damlaların desen üzerinde oluşup büyüdüğünü gözlemlemiş ve hegzadekantiyol ile kaplanması ile elde edilen yüzeyde süperhidrofobluğun yoğunlaşma öncesi ve sonrasında korunduğu ve damlaların yüzeye salınım yapıldığında hareket ettiğini görmüşlerdir [Chen, 2007].

Dorrer and Rhe tarafından hidrofobik floropolimer kaplı kare silikon kolonlu przly zeyler üzerinde yoğunlaşma gerçekleştirmiştir. Wenzel damlaları boşluk kısımda oluşmuş olup bu küçük damlaların yoğunlaşma sırasında birleşerek boşluk kısımları doldurması ve sonrasında damlaların kolon üzerinde oluşan Cassie damlaları ile birleşerek pinning kuvvetlerinin yenilmesi ile Wenzel durumundan Cassie durumuna geçişi olduğunu göstermişlerdir [Dorrer, 2007].

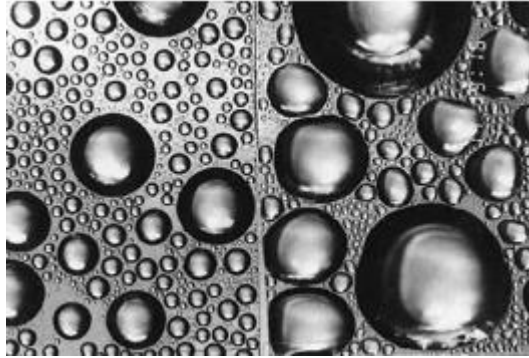
Mockenhaupt et al., süperhidrofobik bitki yapraklarının ve teknik zeylerin yoğunlaşma altındaki kararlılıklarını incelemiş olup çoğu zeyin yoğunlaşma sonrasında temas açısında büyük düşüşler gözleyerek yoğunlaşma sonunda kararlı olmadıklarını görmüşlerdir. En iyi kararlılık gösteren bitki yaprağının nilüfer çiçeği olduğunun ve mikro özellikteki süperhidrofob zeylerin yoğunlaşma sonrasında kararlılıklarını korumadığı ve nano özellikteki süperhidrofob zeylerin yoğunlaşma sonrasında kararlılıklarını koruduğu sonucuna varmışlardır [Mockenhaupt, 2008].

Wier and Mc Carty, kare ve dört kollu yıldız desenli dimetildiklorosilan kaplı temas açısı 170° den büyük ultrahidrofob zeyler üzerinde yoğunlaşmayı ve bunun damlaya olan hareketini incelemişlerdir. Damlaların oluşumunun ve büyümesinin diğer çalışmalardaki gibi olduğunu görmüşler ve yoğunlaşma ile ıslanan zey üzerinde histeresisin kuru zey ile kıyaslandığında oldukça azaldığını ve bunun sonucunda da su damlası hareketinin azaldığı sonucuna ulaşmışlardır [Wier and McCarty, 2006].

4.4.3. Yoğunlaşan Sıvının zey Kaplama Oranı

Yoğunlaşan sıvının zey kaplama oranı, ϵ^2 , zeydeki damlaların toplam zey alanının substrat alanına oranı şeklinde tanımlanmaktadır. Yoğunlaşmanın başlangıcında yoğunlaşan sıvının zey kaplama oranı (surface coverage ratio) oldukça düşüktür. Zamanla damlaların büyümesi ile yoğunlaşan sıvının zey kaplama oranının arttığı görülmektedir. Yoğunlaşan sıvının zey kaplama oranı zeyin ıslatılabilirlik özellikleri ile yakından ilgilidir ve temas açısının artışı ile yoğunlaşan sıvının zey kaplama oranının azalması söz konusudur. Örneğin temas

açısının 10° olduğu yüzeyler üzerinde yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranı 95%, temas açısı 90° olan silanlanmış yüzey üzerinde 55% olarak bulunmuştur. Hidrofob veya süperhidrofob yüzeylerde yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranı hidrofil yüzeylere göre hidrofil yüzeylerde suyun yüzeyde daha fazla alan kaplaması nedeni ile daha düşüktür [Leach, 2006; Boreyko, 2009].



Şekil 4.12. Yoğunlaşmanın ilerleyen zamanlarında polietilen yüzeyindeki damlaların görüntüsü [Briscoe, 2005].

Burada denge temas açısı, serbest yüzey enerjisi ve temas açısı histeresisi ile yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranı arasındaki ilişkiyi anlamak adına 5 adet yüzey üzerinde yoğunlaşma çalışması gerçekleştirilmiş olup temas açısının artışı ile yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranının azaldığı sonucu teyit edilmiştir.

4.4.4. Su Damlası Oluşumu ve Büyümesi

Hava içindeki su buharının bir yüzey üzerinde yoğunlaşması ve sıvı suya dönüşmesi olayı sonucunda su damlası oluşmaktadır. 19. yüzyılın başlarında su damlası oluşumu üzerinde çalışılmaya başlanmış ve 20. yüzyılın ortalarında bir görüş öne sürülebilmektedir. Meteoroloji uzmanlarına göre su damlası oluşumu yağış gibi değerlendirilmemelidir çünkü su damlası oluşumu oluştuğu substrata bağlıdır. Su bilimcilere göre su damlası oluşumu bir su kaynağı olabilmektedir. Havadaki su buharını saf halde elde edebilmek için çalışmalar yapılmaktadır.

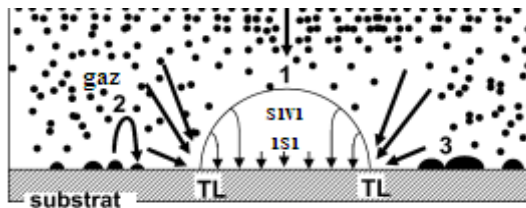
Su damlası oluşumu substrat, yüzeyin ıslanabilirlik özelliği ve yoğunlaşan fazın termodinamiğine bağlı olarak gerçekleşmektedir. Substratın geometrisi damlaların daha düşük boyutta bir yüzey üzerinde büyümesini sınırlamaktadır. Substrat iki boyutlu ise düzlem, bir boyutlu ise doğrudur. Boyutsuz olduğu durumda yağmur oluşumu ve sis oluşumunda olduğu gibi substrat bir noktadır

Hava içerisinde belirli bağıl nemde ve sıcaklıkta bulunan su buharı soğuk yüzey ile temas ettiğinde temas ettiği bölgelerde küçük damlalar halinde su damlası haline dönüşmektedir. Yüzeyde oluşan küçük damlalar birbirine değecek kadar büyümekte ve birleşmektedir [Beysens, 2006].

Yüzeyde oluşan damlaların büyümesi için üç mekanizma söz konusudur. Bunlar:

1. Damla yüzeyinde direk olarak su buharının difüzlenerak yerleşmesi. Bu durum oluşan damlanın latent ısısını açığa çıkarması ile üçlü faz çizgisinde (TL) maksimum sıcaklık gradyentine neden olması ile gerçekleşmektedir.
2. Oluşum ve kritik yarıçapa yakın damlaların buharlaşması sonucunda yüzeyde damlaya doğru difüzyonu ile gerçekleşmektedir.
3. Küçük damlaların oluşması, oluşanların büyümesi ve birleşmesi şeklinde gerçekleşmektedir.

Damlaların büyümesine ait mekanizmalar Şekil 4.13' de gösterilmektedir.

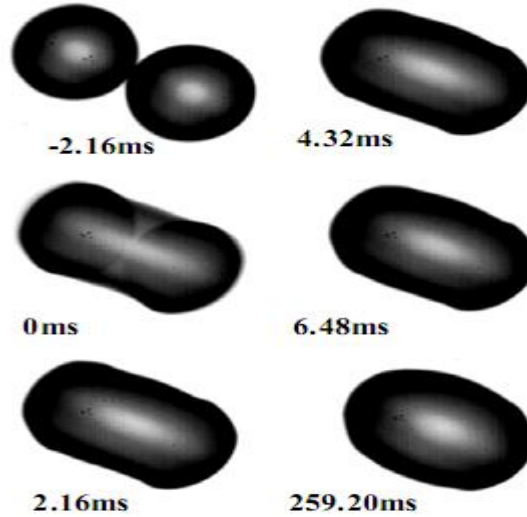


Şekil 4.13. Damla büyüme mekanizmalarının şematik gösterimi 1. Direk olarak sıcaklık gradyentine bağlı olarak damlaya su buharının difüzlenerak 2. Yüzeyde oluşan damlaların yüzeyde damlaya difüzlenerak 3. Küçük damlaların oluşması, büyümesi, birleşmesi. TL; Üçlü faz temas çizgisi, (Three phase contact line). [Beysens, 2006].

Hareketsiz tek bir damla kendi çevresinde büyümektedir. Kendi çevresinde büyümüş iki damla birbiri ile temas edebilecek büyüklüğe ulaştığında iki damla birleşmektedir. Oluşan yeni damlanın hacmi ilk iki damlanın hacminin toplamı kadardır. Yeni damla, iki küçük damlaya göre yüzey alanı ve yüzey enerjisinin azalması nedeni ile enerji açısından avantajlıdır [Steyer, 1991; Beysens, 2006]. Damlaların birleşimi başlangıç koşullarından etkilenmektedir [Narhe, 2003].

Birleşim olayı iki aşamada gerçekleşmektedir. (i) damlalar arasında bir köprü oluşumu ve uzun şekilli birleşik damlanın oluşumu (ii) birleşen damlanın temas çizgisinin önemli bir rol oynadığı küresel bir şekle yakın halde gevşemesi. Birleşim olayının şematik gösterimi Şekil 4.14' da görülmektedir.

Birleşmiş damla birleşim nedeni ile belirli bir müddet temas açısı azalarak gevşemektedir. Gevşeme zamanı damlanın hacmine, başlangıç koşullarına ve yüzey özelliklerine (temas açısı, pürüzlülük) bağlı olarak birkaç saniye olabilmektedir.

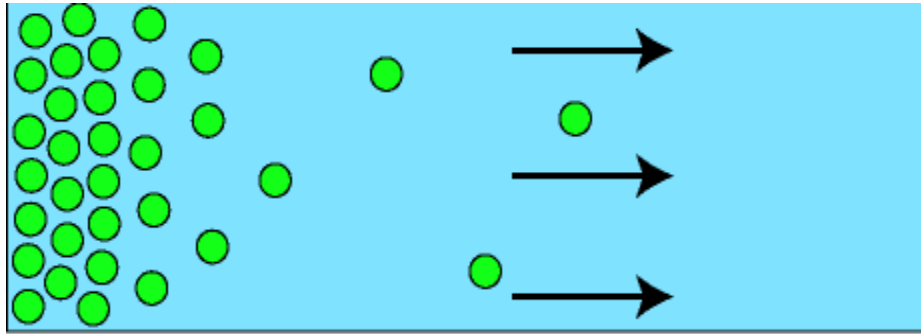


Şekil 4.14. Birleşim işleminin örnek bir fotoğrafı [Narhe, 2003].

5. DİFÜZYON

Difüzyon, kelime olarak yayılma anlamına gelmektedir. Gaz, sıvı veya katı bir madde dışardan etki olmadan konsantrasyon farklılığı, sıcaklık ve basınç gibi sadece ortam koşullarına bağlı olarak başka bir gaz, sıvı veya katı bir madde içerisinde kendiliğinden rastgele hareket etmektedirler. Difüzyon, molekül, atom ve iyonların her yerde aynı bir konsantrasyon meydana getirmek üzere ortam koşullarına bağlı olarak kendiliğinden yayılmaları şeklinde tanımlanabilmektedir.

Difüzyon için gerekli yürütücü kuvvet konsantrasyon farklılığıdır ve bir ortamda uzaklığa göre konsantrasyonun değişimi ve zamana bağlı olarak dışarıdan hiçbir etki olmadan molekül, atom ve iyonların kendiliğinden hareketi ile gerçekleşmektedir. Molekül, atom ve iyonlar yüksek konsantrasyondan düşük konsantrasyon yönünde hareket etmektedir. Difüzyon bir kütle aktarım olayıdır ve bu şekilde gerçekleşen kütle aktarımı “molekül sel yayınma ile kütle aktarımı”dır.



Şekil 5.1. Difüzyon olayının şematik gösterimi

(<https://missbakersbiologyclasswiki.wikispaces.com/Test+Study+Guide?f=print>).

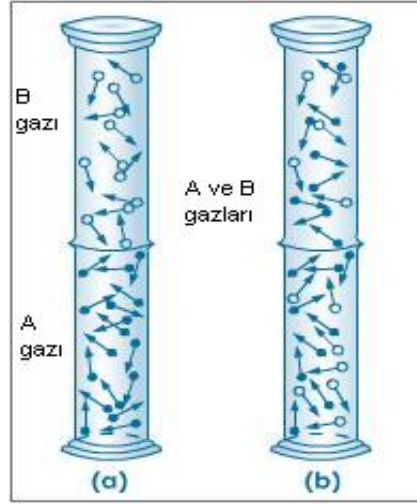
Gaz faz içinde difüzyona bir örnek verilecek olursa, kapısı ve penceresi kapalı bir odanın bir köşesinde duran bir kişi elinde bulunan parfüm şişesinden bir miktar parfümü bulunduğu yere püskürtsün. Bir müddet sonra bu kişinin yakınında bulunan kişi parfüm kokusunu alır. Parfüm sıkan kişiye daha uzak mesafede bulunan kişiler ise parfüm kokusunu daha sonraları alırlar. Parfümü sıkan kişinin bulunduğu bölgede

parfüm moleküllerinin konsantrasyonu en fazladır. Bu bölgede moleküller hava ile karışırlar. Parfüm molekülleri konsantrasyon farkını ortadan kaldırmak üzere konsantrasyonu çok olan bölgeden az olan bölgeye kendiliğinden hareket etmektedir. Böylelikle parfüm sıkan kişiye belli mesafede duran kişiler zaman farklılığı ile parfüm kokusunu alırlar.

Difüzyon olayı yavaş gerçekleşen bir olaydır ve duruma bağlı olarak çok yavaş gerçekleşen bir olay da olabilir. Gazlar için difüzyon hızı saniyede 0,16 cm, sıvılarda saniyede 8×10^{-4} cm, katılarda ise saniyede $1,6 \times 10^{-7}$ cm dir.. Bu değerler sabit değildir, sıcaklık ve moleküllerin cinsiyle değişen değerlerdir. Difüzyon olayı, katı, sıvı ve gaz ortamlarında olabilir, bunlardan “gaz difüzyonu” üzerinde durulacaktır.

5.1. Gazlarda Difüzyon

Gaz molekülleri doldurabilecekleri tüm hacme kendiliğinden yayılma eğilimine sahiptirler. Bu yüzden, birbiri ile temasa gelen iki ayrı tür gazın molekülleri aynı koşullar altında bulunsalar bile birbirleri içinde kendiliğinden karşılıklı olarak yayınarak homojen bir karışım oluştururlar. Aynı molekülleri içeren ve aynı koşullarda bulunan gazlar da birbiri içine kendiliğinden yayınarak Brown hareketleri yapmaya devam ederler. Farklı koşullarda bulunan farklı veya aynı molekülü gazlar da birbiri içinde kendiliğinden yayınır. Örneğin bir hava gazı kaçağı sırasında dışarıya çıkan gazın hava içinde kendiliğinden yayındığı kokusunun evin her yerinden duyulmasından anlaşılmaktadır. Gazların birbiri içinde kendiliğinden dağılması olgusuna “ gazların difüzyonu” denir. Günlük yaşantımızda rastladığımız temiz veya pis kokuların tümü bu kokulara yol açan moleküllerin hava içinde kendiliğinden yayınmasından kaynaklanmaktadır [Erdik, 2002].



Şekil 5.2. Gaz moleküllerinin birbirleri içindeki difüzyonu

(www.tutorvista.com/ks/diffusion-constant-in-water).

Gazlarda difüzyon olayı gaz moleküllerinin hareketlerinden kaynaklanmaktadır. Her gaz molekülü etrafında bulunan diğer gaz molekülleri ile sık sık çarpışmaktadır ve bunun sonucu olarak da yön değiştirirler. Moleküllerin ard arda olan iki çarpma arasında aldıkları yola “serbest yol” , her iki çarpma arasında farklı uzunluklarda olan serbest yolların aritmetik ortalamasına ise “ortalama serbest yol” adı verilir. Ortalama serbest yol moleküllerinin büyüklüğü ve birim hacimdeki sayıları ile ilişkilidir. Difüzyon olayı gaz moleküllerinin ortalama serbest yollarının olmasının bir sonucudur. Gaz moleküllerinin Brown hareketleri ise yalnızca çarpışma sırasında toplam enerjiyi eşit olarak paylaşmamaktan ve sürekli enerji değiş tokuşundan kaynaklanmaktadır.

Gazların difüzyonunun tamamlanması moleküler hızın oldukça yüksek olmasına rağmen yavaş gerçekleşmektedir. Bunun nedeni ise yayınan gazın hem kendi molekülleri ile hem de eğer sistem içinde başka maddeler mevcutsa bu maddelerin buhar halindeki moleküller ile çarpışarak zig zaglı yol izlemesidir.

Thomas Graham 1828-1833 yılları arasında yaptığı denel çalışmalarda difüzyon diye adlandırılan gaz moleküllerinin yayınlık hızının, gazın mol kütlelerinin kare kökü ile orantılı olduğunu bulmuştur.

Kinetik gaz kuramına göre aynı sıcaklıkta bulunan gaz moleküllerinin ortalama kinetik enerjileri birbirine eşittir

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \quad (5.1)$$

Burada v_1 ve v_2 , 1. ve 2. gazların ortalama hızları; m_1 ve m_2 ise aynı gazların molar kütleleridir. (5.1) denkleminde göre gazların ortalama hızlarının kareleri ile molekül kütleleri ile ters orantılıdır. Buna göre iki farklı gaz molekülleri için yayınlık hızı olarak alabilinen ve difüzyon hızı anlamına gelen D ile simgelenen niceliklerin oranı, alınan gazların molekül kütleleri kareköklerine ters orantılı olarak

$$\frac{D_1}{D_2} = \left(\frac{m_2}{m_1} \right)^{1/2} \quad (5.2)$$

şeklinde eşit olmalıdır. Yayınlık hızları D_1 ve D_2 ile ters orantılı olan t_1 ve t_2 yayınlık süreleri yazılabileceği gibi molekül kütleleri, yerine M_1 ve M_2 mol kütleleri alınabilir veya Avogadro yasasına göre molekül kütleleri ile doğru orantılı olan ρ_1 ve ρ_2 yoğunluklar kullanılabilir. O halde Graham yasası en genel şekilde

$$\frac{D_1}{D_2} = \frac{t_2}{t_1} = \left(\frac{M_2}{M_1} \right)^{1/2} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^{1/2} \quad (5.3)$$

yazılabilir. Aynı kinetik enerjiye sahip iki molekülden mol kütlesi küçük olanın hızının büyük olması doğaldır.

Difüzyonun matematiksel tanımları ve temelleri Fick' in difüzyon kanunları üzerine kurulmuştur. Bu yüzden Fick'in difüzyon kanunları üzerine değinilecektir.

Fick'in difüzyon kanununda difüze olan maddenin akış hızı ile bu akıştan sorumlu konsantrasyon gradientine (ortamda uzaklığa göre konsantrasyonun düzgün değişimi) birleştirilmiştir.

5.1.1. Fick'in 1. Difüzyon Kanunu

Bir özelliğin göçme hızı, birim zamanda birim alandan göçen özellik miktarı şeklinde tanımlanan "akı" ile ölçülmektedir. Akan difüzyon olayında olduğu gibi madde ise, saniyede m^2 başına ne kadar molekül bir madde akışı olduğundan söz edilmektedir. Aktarılan özellik termal iletkenlikte olduğu gibi enerji ise, o zaman saniyede m^2 başına Joule olarak enerji akışından söz edilmektedir.

Molekül yayınma ile kütle aktarımı durgun bir ortam içerisinde veya düşük hızlarda akan bir akışkan içerisinde moleküllerin konsantrasyonlarının çok olduğu yerden az olduğu yere moleküllerin hareketleri ile gerçekleşmektedir.

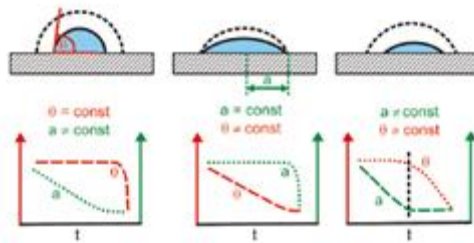
İlk kez Fick tarafından belirtilen ve Fick' in 1. kanunu olarak adlandırılan kanuna göre; bir A+B karışımında, A bileşeni için z yönünde bir derişim gradyanı varsa (gradyan yolla derişim), molekül yayınma ile aktarılan A bileşeninin molar yayınma akışı, J_{Az} ;

$$J_{Az} = -D_{AB} \left(\frac{dc_A}{dz} \right) dx \quad (5.4)$$

şeklinde yazılabilir. Akı, aktarım yönüne dik bir yüzeyin birim alanından birim zamanda geçen miktar olarak tanımlanabilmektedir ($kmolA/m^2s$). Denklemdaki (dc_A/dz) terimi kütle aktarımına neden olan derişim gradyanını ($kmol A/m^3m$), (-) işareti ise kütle aktarımının azalan derişim yönünde gerçekleşeceğini gösterir. D_{AB} A' nın B içindeki molekül yayınma katsayısı olarak adlandırılır (m^2/s). Bu değer A ve B ye bağlı olduğu gibi koşullara (basınç, sıcaklık, derişim) da bağlı olan gerçek bir fiziksel değerdir ve çeşitli deneysel yöntemler ile belirlenmektedir.

5.2. Sıvı Damlası Buharlaşması ve Sıvı Damlası Buharlaştırması ile Difüzyon Sabitinin Belirlenmesi

Sıvı damlalarının buharlaşması özellikle de su damlalarının buharlaşması gündelik hayatta oldukça sık karşılaşılan bir durumdur. Bu konu üzerine araştırmacılar tarafından birçok inceleme yapılmıştır. Picknett ve Bexon ilk kez organik sıvılardan oluşturulmuş damlaların kütlelerindeki değişimlerini ve damla profillerini düze yakın bir yüzey üzerinde takip ederek buharlaşmada iki temel modelin varlığını kanıtlamışlardır. Bu modellerden birincisi sabit temas açısı modelidir. Sabit temas açısı modelinde buharlaşma sırasında temas açısı değişmemekte, damla şekli küresel kalarak temas yarıçapı ve yüksekliği azalmaktadır. Sabit temas açısı modeli ilerleyen ve gerileyen temas açıları arasında fark olmayan; sıvı, katı ve gazın dengede bulunduğu ideal sistemde beklenen bir davranıştır. Modellerden ikincisi sabit temas alanı modelidir. Bu modelde yüzey ve sıvı arasındaki temas alanı (yarıçapı) değişmemekte, buharlaşma sırasında temas açısı azalırken damla küreselliğini korumaktadır. Sabit temas alanı (yarıçapı) modeli ilerleyen ve gerileyen temas açıları arasındaki farkı gösteren temas açısı histeresisin var olduğu durumda beklenmektedir ve buharlaşma gerileyen temas açısına ulaşana kadar bu modelde devam etmektedir. Sonrasında ise sabit temas açısı modelinde buharlaşma devam etmektedir. Buharlaşma tek başına iki modelden oluşan bir şekilde gerçekleşebildiği gibi iki modelin karışımından oluşan ve karışmış (mixed) model şeklinde de gerçekleşebilmektedir. Bu çalışmada iki model hem teorik hem de deneysel olarak incelenmiştir [Picknett and Bexon, 1977].



Şekil 5.3. Katı bir yüzey üzerinde buharlaşan bir sıvı damlasına ait sabit temas açısı, sabit temas yarıçapı, karışmış buharlaşma modelleri [Li, 2009].

Birdi et al. mikroskop camlarda farklı hacimlerde damlaların kütle değişimlerini tartarak ölçmüşler ve buharlaşma süresince damlanın profilini görüntüleyerek buharlaşma hızının sıvı-buhar ara yüzeyindeki yarıçapa (temas yarıçapı) ve temas açısına bağlı olduğunu göstermiş, ve lineer olduğunu bulmuşlardır. Buharlaşma süresince temas yarıçapının sabit kaldığını, temas açısının ise azaldığını gözlemlemişlerdir [Birdi et al., 1989].

Rowan et al., polimetilmetakrilat yüzeyinde küçük su damlalarının buharlaşmasına bağlı olarak geometrisindeki ve kütledeki değişimleri incelemişlerdir. Su temas açısı, $\theta < 90^\circ$ geçerli olduğu durumda zamanla kütle azalışı hızının damlanın yüksekliği h , ve temas yarıçapı r_b ile orantılı olduğunu fakat küresel yarıçap, R ile orantılı olmadığını göstermişlerdir. Sonuçlar küresel kasket modeli referans alınarak açıklanmıştır [Rowan et al., 1995].

McHale et al., ıslatmayan sistemdeki durgun damlanın buharlaşma süresinde geometrik parametreleri detaylı olarak ölçülmüştür. Teflon film üzerinde su damlası sistemi başlangıç temas açısının 90° 'den büyük olması nedeniyle tercih edilmiştir. Buharlaşma süresince gözlenen temas açısı çoğunlukla bir değer de sabit kalmıştır. Buharlaşma modeli daha önce tanımlanan iki modelin bir kombinasyonu şeklinde olmuştur [McHale et al., 1998].

Furuta et al., fluoroalkilsilan kaplı nano ölçekte pürüzlü ve pürüzsüz hidrofobik yüzeylerde mikrolitre ve nanolitre hacimli su damlaların buharlaşması incelemişlerdir. Mikrolitre hacimli damların buharlaşmasının pürüzlü ve pürüzsüz yüzeyler üzerinde aynı olduğu ve buharlaşma sırasında temas açısının sabit kaldığı görmüşler. Nanolitre su damlasının buharlaşmasında ise pürüzlü ve pürüzsüz yüzeyler üzerinde farklı olduğunu görmüşlerdir. Pürüzsüz yüzeyler üzerinde temas açısında üç bölge oluşurken, r^2 'nin zamanla değişiminde lineer değişim görülmüştür. Pürüzlü yüzey üzerindeki nanoliter hacimli damlanın buharlaşması ise temas açısı buharlaşma süresince sürekli olarak azalmakta olduğunu ve temas açısının 90° altına düşmesi nedeni ile de r^2 'nin zamanla azalarak lineerlikten saptığı analiz edilmiştir. Nano ölçekte yüzey heterojenliğinin nanoliter suyun buharlaşmasını etkilediği sonucuna ulaşılmıştır [Furuta, 2009].

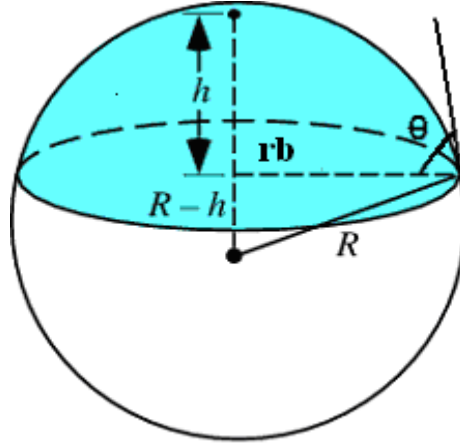
McHale et al., 5- 15 µm aralığında çaplara sahip silindir desenli süperhidrofobik yüzeyler üzerinde 1-2 mm çaplı su damlalarının buharlaşmasını incelemişler ve denemelerin sonucunda bu yüzeyler üzerinde sabit temas yarıçapı moduna göre buharlaştığını görmüşlerdir [McHale, 2005].

Kulinich and Farzaneh, perfloroalkil metakrilik kopolimerinin alüminyum plakalara spreyle kaplanması ve spin(döndürerek) kaplanması ile temas açısı histeresis değerlerinin $>70^\circ$ ve $\sim 5^\circ$ olduğu süperhidrofobik yüzeyler hazırlayarak bu yüzeyler üzerinde buharlaşmayı incelemişler ve temas açısı histeresisin yüksek olduğu yüzey üzerinde sabit temas çapı moduna, temas açısı histeresisin düşük olduğu yüzey üzerindeki buharlaşmanın ise sabit temas açısı moduna uygun olduğu sonucuna ulaşmışlardır [Kulinich, 2009].

Yüzeylerde buharlaşmalar kütle değişiminden yola çıkarak AFM uygulamalarında da kullanılmaktadır. Burada da kantilever üzerinde buharlaşmanın varlığından dolayı meydana gelen kütle azalışı kantileverde meydana gelen titreşimden yararlanarak ölçülmüş ve buharlaşma analizleri hidrofobik yüzeyler üzerinde gerçekleştirilmiştir ve sonuç olarak diğer buharlaşma çalışmaları ile uygun sonuçlara ulaşılmıştır [Golovko, 2009; Li, 2009].

Yapılan tüm çalışmalar bu sıvı damlasının küresel olduğu varsayımına dayanılarak yapılmıştır. Küresellikten sapan damlalar için çeşitli düzeltme faktörleri hesaba katılarak yeni modellemeler yapılmıştır. Yatay bir katı üzerine damlatılan damla yeterince küçük ve küresel ise, o zaman 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 parametre ile şekillendirilebilir. Bunlar; damlanın yüksekliği (h), temas yarıçapı (r_b), küresel damlanın yarıçapı (R) ve damlanın katı ile yaptığı temas açısıdır (θ) [Erbil and Meriç, 1997].



Şekil.5.4. Küresel damla üzerindeki h , r_b , R ve θ değerlerinin gösterilmesi (mathworld.wolfram.com/SphericalCap.html).

Üç boyutlu geometriden bilinen r_b ve R yarıçapları, temas açısı ve yükseklik arasındaki ilişki aşağıdaki denklemlerle verilir [Birdi, 1989; Bourges- Monnier, 1995; Erbil, 1997; McHale, 1998, Erbil, 2002; Panwar, 2003; Fang, 2005; McHale, 2005; Kim, 2007] :

$$r_b = R \sin \theta \quad \text{ve} \quad R = \left(\frac{3V}{\pi\beta} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (5.5)$$

$$\beta = 2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta = (1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta) \quad (5.6)$$

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

$$h = R(1 - \cos \theta) \quad \text{ve} \quad h = r_b \tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \quad (5.7)$$

Damla kütlesinin zamanla azalması Fick Kanununa dayanır ve,

$$-\frac{\partial m}{\partial t} = 4\pi R^2 D \frac{\partial c}{\partial R} \quad \text{şeklinde ifade edilir.} \quad (5.8)$$

burada $\left(\frac{\partial c}{\partial R}\right) = \left(\frac{c_o - c_v}{R}\right)$ olduğundan; (5.9)

5.8 numaralı eşitlik aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$-\frac{\partial m}{\partial t} = -\left(\frac{\partial V}{\partial t}\right) \rho_L = 4RD\pi(c_o - c_v) \quad (5.10)$$

$$-\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{4\pi RD(c_o - c_v)}{\rho_L} \quad \text{yazılır,} \quad (5.11)$$

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

$$PV = nRT \quad \text{ve} \quad c_o = \frac{W}{V} \quad \text{alınarak} \quad (5.12)$$

$$c_o = \frac{P_{vs} M_w}{RT} \quad \text{eşitliğinden bulunur.} \quad (5.13)$$

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

$$RH = \frac{P_v}{P_{vs}} \quad \text{eşittir.} \quad (4.7)$$

$$P_v = RH \times P_{vs} \quad \text{eşitliğinden bulunur. Buradan} \quad (5.14)$$

$$c_v = \frac{P_v M_w}{R T} \quad \text{olarak bulunur.} \quad (5.15)$$

$$\text{Üç boyutlu geometriden; } V_3 = \frac{\pi r_b}{3} \frac{(1 - \cos\theta)^2 (2 + \cos\theta^2)}{\sin^3\theta} \quad \text{yazılır.} \quad (5.16)$$

bu eşitlikte yer alan;

$$R = \frac{r_b}{\sin\theta} \quad \text{ve} \quad (5.17)$$

$$\beta = (1 - \cos\theta)^2 (2 + \cos\theta) \quad \text{alınarak} \quad (5.18)$$

$$R = \left(\frac{3 V_3}{\pi \beta} \right)^{1/3} \quad \text{yazıldığından ve,} \quad (5.19)$$

$$\frac{\partial V_3}{\partial t} = \frac{4\pi D}{\rho_L} \left(\frac{3 V_3}{\pi \beta} \right)^{1/3} (c_o - c_v) = K_1 V_3^{1/3} \quad (5.20)$$

$$\text{burada, } K_1 = \frac{4\pi^{2/3} 3^{1/3} D(c_o - c_v)}{\rho_L \beta^{1/3}} \quad \text{dır,} \quad (5.21)$$

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

$$\frac{\partial V_3}{\partial t} = K_1 V_3^{1/3} f(\theta) \quad (5.22)$$

şeklinde yazılır. Bu ifadenin integrali alınırsa,

$$V_3^{2/3} = V_{3i}^{2/3} - \frac{2}{3} K f(\theta) t \quad (5.23)$$

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

V_3 değeri [Meriç and Erbil, 1998];

$$V_3 = \frac{\pi r_b^2 h (2 + \cos\theta)}{3 (1 + \cos\theta)} \quad \text{olarak ifade edilir.} \quad (5.24)$$

Picknett ve Bexon tarafından;

$$f(\theta) = \frac{1}{2} \left[\frac{C}{R_S} \right] \quad [\text{Picknet and Bexon, 1977}] \quad (5.25)$$

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

$$\frac{C}{R_S} = 0,00008957 + 0,6333\theta_{\text{rad}} + 0,1160\theta_{\text{rad}}^2 - 0,08878\theta_{\text{rad}}^3 + 0,01033\theta_{\text{rad}}^4 \quad (5.26)$$

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

$$D = \frac{K \rho_L \beta^{1/3}}{4 \pi^{2/3} 3^{1/3} D (c_0 - c_v)} \quad (5.27)$$

6. MATERYAL – METOT

6.1. Buharlaşma Denemeleri (Mikro desenli yzzeylerin izerindeki su damlası buharlaşma hızı denemeleri)

Su damlası buharlaşması hızının belirlenmesi için gerçekleştirilen tüm denemelerde su olarak ultra saf su kullanılmıştır.

Denemeler sabit bağıl nemin sağlandığı Şekil 6.1' de gösterilen 7 cm x 20 cm x 3 cm boyutlarında Şeffaf pleksiglasstan yapılmış st kısmında kapağı bulunan bir hücre içerisinde gerçekleştirilmiştir.

Hücrenin st kısmına kapağı ile arasında dış ortam ile arasında hava alışverişini engellemek amacıyla lastik kauçuk bally ile yapıştırılmıştır. Pleksiglass hücre ve kapağının temizliği önce saf su ile daha sonra etanol ile silerek ardından kurumaya bırakılarak gerçekleştirilmiştir.

Hücrenin st ve yan kısımlarına içerisine septum girecek boyutlarda delikler açılmıştır. Delikler pleksiglassa zarar vermemek için sırası ile kk çaptan büyük çapa olmak üzere gerekli boylarda matkap uçları kullanılarak matkap yardımı ile açılmıştır. Her iki deliğe de septum yerleştirilmiştir. st kısımdaki septum, numune yüzeyinde su damlası oluşturulabilmesi için kullanılan iğnenin hava akımı olmadan ve hücrenin bağıl nem dengesi bozulmadan, hücreye sokulabilmesi amacı ile yerleştirilmiştir. Yan kısımdaki septuma, numuneyi hareket ettirmek amacıyla ucu kıvrık bir tel yerleştirilmiştir. Septumlar yardımı ile hücre içerisinde nem dengesi bozulmadan denemeler gerçekleştirilmiştir. Su, numunelerin yüzeyinde KSV CAM 200 cihazına ait dispenser kontrollü bir hipodermik şınga-iğne yoluyla oluşturulmuştur.

Numunenin KSV CAM 200 cihazından görüntü alımında kolaylık sağlaması ve dümdüz durabilmesi için metanol, aseton ve saf su ile temizlenmiş üç adet cam lam st üste selobant ile yapıştırılarak hücreye yerleştirilmiştir.

Hücrenin ortam sıcaklığından etkilenmemesi için görüntü alımına engel olmayacak ve deneme gerçekleştirilmesini zorlaştırmayacak şekilde iki uç kısmı cam yünü ve izolasyon malzemesi ile izole edilmiştir. Ayrıca hücrenin bağıl nem dengesini koruyabilmesi ve ortam hava akımından etkilenmesini engellemek için iki uç kısmına kauçuk lastik gergin bir şekilde bağlanmıştır.



Şekil.6.1. Pleksiglass hücre.

6.1.1. Numunelerin Hazırlanışı

6.1.1.1. Mikro Desenli Yapıların Hazırlanışı

4" çapında, 525 +/- 25 μm kalınlığında, <1-0-0> yönelimli, 1-10 $\Omega\text{-cm}$ yüzey dirençli, silisyum disk alınmıştır. Silisyum disk 110°C 'deki fırında 15 dakika süre ile yüzeyinde olası nemden kurutmak için tavlannmıştır. Silisyum diskin ön yüzü ultraviyole (UV) ışığa duyarlı fotorezist malzemesi ile dönel kaplama cihazında (spinner) 30 saniye süre ile 4000 rpm hızında döndürülerek kaplanmıştır. Kaplama işleminden hemen sonra 115°C sıcaklıktaki sıcak tabla üzerinde 1 dakika süre ile tavlannmıştır. Silisyum disk üzerindeki fotorezist malzeme, üzerinde tasarım

şekillerinin bulunduğu maske camı kullanılarak hizalama ve pozlama cihazında (Aligner) 5 saniye süre ile UV ışık altında pozlanmış, pozlaması yapılan ve üzerinde fotorezist bulunan silisyum disk developer çözeltisinde ~ 1 dakika süre ile aşındırılmıştır. Bu işlem sırasında, pozlama (UV ile ışıklandırma) sırasında disk üzerinde ışık gören kısımlardaki fotorezist malzeme çözünerek eriyip yok olmaktadır, ışık görmeyen kısımlardaki fotorezist ise disk üzerinde kalmaktadır.

Üzerindeki fotorezist malzemesi şekillendirilmiş olan silisyum disk, derin reaktif iyon aşındırma (DRIE) sisteminde aşındırma işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlem sırasında silisyum disk yüzeyi, fotorezist ile maskelenmemiş gölgelerinden derinlemesine doğru aşındırılmaktadır. Aşındırma işlemi aşındırılan kısmın derinliği ~30µm olacak şekilde ayarlanmıştır. DRIE sistem ile aşındırma işlemi tamamlanan silisyum disk, üzerindeki fotorezist malzemenin temizlenmesi amacı ile O₂ plasma ortamında tutulmuştur ve O₂ plasma temizlik işlemi yüzey üzerindeki fotorezist malzemenin tamamen temizlenmesine kadar devam etmiştir. Temizlik işlemi tamamlanan silisyum disk, üzerindeki tasarım bölgelerinin birbirinden ayrılması için otomatik disk kesme işleminden geçirilerek her bir tasarım bölgesinin birbirinden ayrılması sağlanmıştır.*

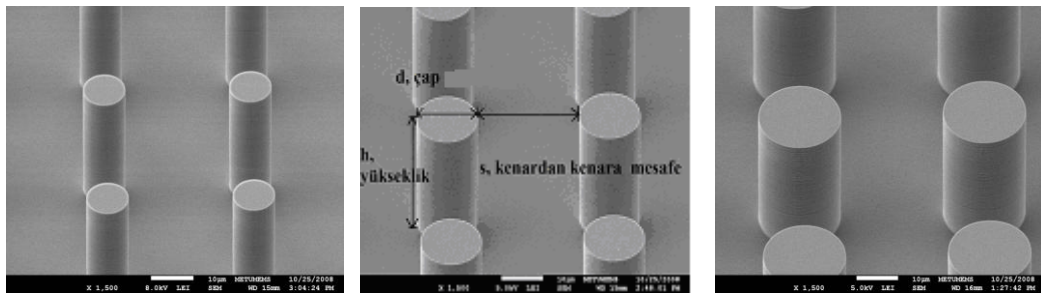
Bu şekilde elde edilen yüzeyler üzerinde düzlemsel silindirik desenler oluşturulmuştur. Denemelerde kullanılan numunelerin kodları ve desen çapı, yükseklik, desenler arası kenardan kenara mesafe ve numune yüzeyinde ölçülen su denge temas açısı özelliklerine ait değerler Çizelge.6.1' de verilmiştir.

* Numuneler Ortadoğu Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü' nde Tayfun AKIN ve Orhan AKAR tarafından hazırlanmıştır.

Çizelge 6.1. Numunelerin düzlemsel silindirik yerleşmiş desenlerin desen çapı, iki desen arasındaki mesafesi, desenlerin yüksekliği ve numunelerin denge temas açısı değerleri.

Numune	Desen Çapı d(um)	Kenardan Kenara Mesafe, s(um)	Yükseklik h(um)	s/d	Θ_{denge}
GYTE 41	9,56	25,00	31,79	2,62	$165^{\circ} \pm 2$
GYTE 44	15,44	25,00	34,40	1,62	$162^{\circ} \pm 2$
GYTE 39	9,56	14,71	34,15	1,54	$164^{\circ} \pm 2$
GYTE 45	19,85	24,26	32,10	1,22	$160^{\circ} \pm 2$
GYTE 38	9,56	10,29	33,94	1,08	$159^{\circ} \pm 1$
GYTE 46	25,00	24,26	32,22	0,97	$157^{\circ} \pm 2$

Silindirik desenlerin yüksekliği h, desen çapı d, iki desen arasındaki mesafe ise s ile simgelenmiştir. GYTE 41, GYTE 44, GYTE 45 kodlu numunelere ait örnek SEM görüntüleri Şekil 6.2' de gösterilmiştir.



Şekil.6.2. GYTE 41, GYTE 44, GYTE 45 numunelerine ait 1500x büyütme ve 45° eğimli SEM görüntüleri.

Kenardan kenara mesafe (s) değerlerinin çok yakın iken desen çapı (d) değerlerinin farklılaştığı, kenardan kenara mesafe ve desen çapı oranının (s/d) farklı olduğu numuneler üzerinde 5 µl su damlası ile buharlaştırma denemeleri gerçekleştirilmiştir ve numune desenindeki geometri farklılığının buharlaşma hızına etkisi araştırılmıştır.

6.1.1.2. Mikro Desenli Yapıların Temizlenmesi

Desenlenmiş Si disk yüzeyleri temizlemek için 3:1 (v/v) oranda Riedel marka H₂SO₄: H₂O₂ (%30) karıştırılarak piranha çözeltisi hazırlanmıştır. Desenli numuneler ve düz (desenlenmemiş) Si disk substratlar ayrı ufak kavanozlar içerisinde piranha çözeltisinde gece boyunca bırakılmıştır. Asidin çubuklarla desenlenmiş yüzeylerden uzaklaştırılması oldukça zor bir işlemdir. Piranha çözeltisinin yüzeylerden uzaklaştırılması için örneklerin yüzeylerine su püskürtülerek örnekler yıkanır. Yıkama işlemi laboratuvarımızda bulunan pen-sprey ile desen yüzeylerine su püskürtmesiyle yapılmaktadır. Su püskürtülmesinin nedeni, desenler arasında gömülmüş kalabilecek asidi yüzeyden tamamen uzaklaştırmaktır. Yüzeyler üzerine su püskürtülerek temizlik yapılmasından sonra numuneler vakum etüvünde 120°C’ da 1 saat süreyle tam vakum altında kurutulmuştur. Kurutulan numunelerde temas açısı ölçümleri yapılarak elde edilen sonuçlardan piranha çözeltisinin yüzeylerden tamamen uzaklaştığı anlaşılmaktadır. Eğer piranha çözeltisi yüzeyden uzaklaşmamışsa su damlası desenli yüzeyler üzerinde yayılmaktadır.

6.1.1.3. Mikro Desenli Yapıların Süperhidrofobikleştirilmesi

Temizlik işlemi tamamlandıktan sonra örnek yüzeylerine dimetildiklorosilan (DMDCS-Floka) bileşiği ile kaplama yapılarak yüzeyler süperhidrofobik hale getirilmişlerdir. DMDCS, MERCK hekzan solventi içerisinde %50 (v/v) oranda seyreltilmiş ve örnekler vakum etüvünde 60°C’ da 24 saat süreyle DMDCS buharına maruz bırakılarak kaplama yüzeylere uygulanmıştır.

6.1.2. Bağıl Nemin Kontrol Edilmesi

Denemelerde buharlaşması takip edilen sıvının su olması nedeniyle o esnada hava içinde su buharı halinde bulunan nem miktarının bilinmesi önemlidir. Bu nedenle denemelere geçmeden önce hücrelerin içindeki havanın bağıl neminin sabitlenmesi gerekmektedir.

Hücre içerisinde bağıl nemi sabitlemek amacıyla doymuş tuz çözeltileri kullanılmıştır. Hazırlanan doymuş tuz çözeltileri hücre içerisine alüminyum folyodan yapılan kaplar içerisine konarak yerleştirilmiştir. Alüminyum folyodan oluşan kaplar ise hücre içerisine yerleşecek şekilde şekillendirilmiştir. Alüminyum kaplara konacak olan doymuş tuz çözeltisinin alüminyum kaptan sızıntı yapmasını önlemek amacı ile Alüminyum kaplar 80 °C' ye ısıtılmış parafin çözeltisine daldırılarak kaplama yapılmış ve tuz çözeltilerinin içerisine ilavesinden önce su doldurularak kaplama sonucunda sızıntı olup olmadığı test edilmiştir.

Doymuş tuz çözeltisi olarak 52% bağıl nem sağlayan Merck $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ tuzunun çözeltisi kullanılmıştır.

İki adet Alüminyum folyo kaba hazırlanan doymuş tuz çözeltisi konulduktan sonra çözeltiler hücre içerisine hücrenin iki ucuna gelecek şekilde yerleştirilmiştir.

Bağıl nemin ve sıcaklığın kontrolü için TFA marka termo- higrometre kullanılmıştır. Termo-higrometre 30 g ağırlığında 52 x 39 x 15 mm ebatlarındadır ve hücre içerisine oldukça rahat yerleşebilmektedir. Sıcaklık çalışma aralığı -10°C ile 60°C, bağıl nem çalışma aralığı ise 10%- 99% aralığındadır.



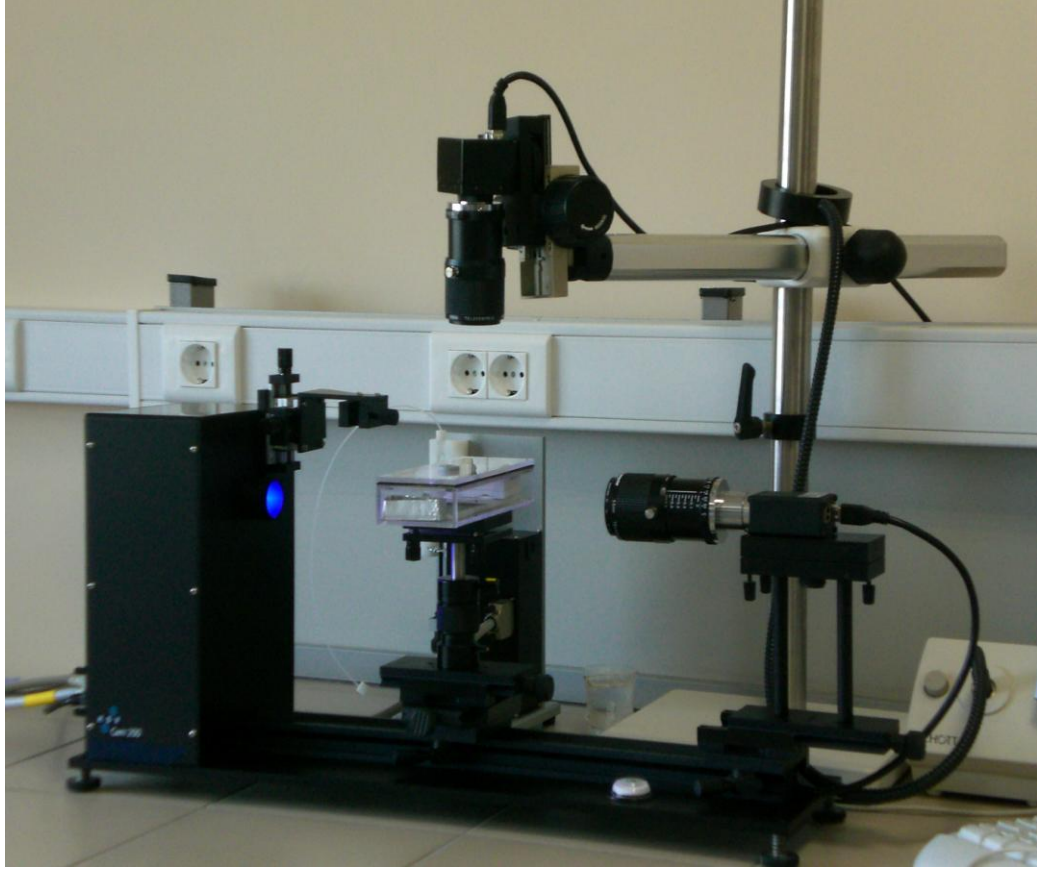
Şekil 6.3. TFA marka termo- higrometre.

Çözeltilerin yerleştirilmesinin ardından nem kontrolünün sağlanabilmesi için termo-higrometre hücreye yerleştirilmiştir. Buharlaşma denemesinin gerçekleştirileceği temiz numune plastik cımbız yardımı ile sabitlenmiş cam lamlar üzerine yerleştirilmiş ve bir gece hücrenin nem dengesinin sabitlenmesi için beklemeye bırakılmıştır.

6.1.3 KSV CAM 200' de Buharlaşma Denemeleri

Su damlası buharlaşması çalışmasında yüzey geometrileri farklı yüzeyler üzerinde su damlasının oluşturulması ile suyun yüzeyler üzerinden buharlaşması takip edilerek her bir yüzey için buharlaşma hızları belirlenmiştir.

Yüzey üzerine damlatılan suyun buharlaşması denemelerinde damlanın yan profillerinin kaydedilmesi için KSV - CAM 200 temas açısı ölçüm cihazı kullanılmıştır.



Şekil 6.4. KSV CAM 200 cihazında yandan görüntüleme sistemi.

Su damlasının buharlaşması denemelerinde 5 μ l su damlası dispenser kontrollü bir hipodermik şırınga-iğne yoluyla oluşturulup numune yüzeyine bırakıldığı andan itibaren damla profil görüntüsü belirli zaman aralıklarında alınmaya başlanmış ve yüzeyde damlanın tamamen buharlaşarak kaybolduğu süre boyunca görüntü alımına devam edilmiştir. KSV CAM 200 cihazında denemeler süresince alınan görüntülerden cihazın kendi yazılımı sayesinde temas açısı, damla hacmi, temas yarıçapı ve yükseklik değerleri hesaplatılıp sonuçlar için gerekli veriler alınmıştır. KSV programının elde ettiği verilerin doğruluğunu tespit etme amacıyla, KSV görüntüleri şekil analiz programı ile değerlendirilmiştir. Şekil analiz programında görüntülerden temas açısı temas yarıçapı ve damla yüksekliği belirlenerek zamana karşı grafikleri çizdirilmiştir. Şekil 6.4' de denemelerin gerçekleştirildiği KSV CAM 200 cihazı ile buharlaşma takibinin gerçekleştirildiği sistem görülmektedir.

6.2. Yoğunlaşma Denemeleri

6.2.1. Yoğunlaşan Sıvının Yüzey Kaplama Oranının Yüzey Özellikleri ile Değişimi Denemeleri

Denge temas açısı, serbest yüzey enerjisi, temas açısı histeresinin yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranına etkisini belirleyebilmek için yüzey özellikleri birbirinden farklı 5 adet polimer yüzey kullanılmıştır. Polimer yüzeyler, poliepoksi ara tabaka ile kaplı cam lamların, homopolimer ve bunların karışımlarından oluşturulan çözeltiler içine belirli sıcaklıklarda ve hızlarda daldırma tekniği kullanılarak kaplanması ile hazırlanmıştır. Polimer yüzeyler siklikolefinik kopolimer (COC), polipropilen (PP), yüksek yoğunluk polietilen (HDPE), etilenvinil asetat (EVA), perfloroakrilat metilmetakrilat kopolimeri (PEF-MMA) kullanılarak hazırlanmıştır.

Polimer yüzeyler üzerinde su damlası yoğunlaşması sağlanmıştır. Yoğunlaşma denemeleri için sirkülatör, bakır soğutucu ve bakır plakadan oluşan sistem kullanılmıştır. Sirkülatör ile bakır soğutucu içerisinden belirli sıcaklıktaki suyun dolaşması sağlanmış böylelikle bakır soğutucunun ve bakır plakanın sıcaklık dengesine gelerek soğuması gerçekleşmiştir. Sıcaklık dengesine gelen sistem üzerine polimer yüzeyler yerleştirilerek yüzeylerin sıcaklıklarının düşüşü gerçekleşmiştir. Ortamın bağıl nemine ve sıcaklığına bağlı olarak çiğlenme noktası sıcaklığı değerinin altında su damlası yoğunlaşması sağlanmış ve numuneler bir süre bakır plaka yüzeyinde bekletilmiştir. Tüm numuneler eşit süre bakır plaka üzerinde bekletilmiştir. Denemeler 55% bağıl nem, 22 °C sıcaklık koşullarında gerçekleştirilmiştir. Yüzey sıcaklıkları 8-9 °C aralığında değişmektedir.

Bakır soğutucu içerisinde belirli sıcaklıktaki suyun dolaşmasının sağlanması için Julabo MV F12 marka sirkülatör kullanılmıştır. Julabo MV – F12 sirkülatörünün sıcaklık çalışma aralığı -25 °C – 200 °C, banyo haznesi 20 cm x 36 cm x 55 cm boyutlarında ve 3 - 4.5 litre hacindedir. Basınç pompası akış hızı 15 litre/dakikadır ve sirkülatör 23 kg ağırlığındadır.

Bakır soğutucu öncelikle bakırın 24 cm x 18 cm boyutlarında dikdörtgen şeklinde kesilip dikdörtgenler prizması haline getirilmesi, daha sonra uç kısımlarına 0.7 cm çaplı silindir şeklinde bakır uçların uygun bir şekilde eklenmesi ile oluşturulmuştur. Tüm eklenti yerleri gümüş lehim ile birleştirilmiştir. Soğutucunun ölçülen iç hacmi 505 ml' dir. Bakır soğutucunun ve yüzeylerin, düz ve dengede durabilmesi için sistem tahta bir desteğin üzerine yerleştirilmiştir.

Yüzeylerin sıcaklık değerleri TP SENIES TP 01 marka K-tipi sıcaklık probu ile ölçülmüştür. K-tipi termocift $-50\text{ }^{\circ}\text{C} - 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık aralığında çalışmaktadır. K-tipi termocift ile ölçülen sıcaklık değerleri CEM DT 613 marka termometrede görüntülenmiştir. Termometre 16.5 cm x 7.6 cm x 4.3 cm boyutlarındadır. 9 V güce sahip pil ile çalışmaktadır. K tipi termocift ile çalışıldığında $-200\text{ }^{\circ}\text{C} - 1372\text{ }^{\circ}\text{C}$ geniş bir sıcaklık aralığını gösterebilmektedir. İki adet termocift takılabilme özelliğine sahiptir.

Ortamin bağıl nemi ve sıcaklığı TFA ve TESTO 615 marka termo-higrometreler kullanılarak tespit edilmiştir.



Şekil 6.5. Yoğunlaşma denemelerinin gerçekleştiği sirkülötör, bakır soğutucu ve bakır plakadan oluşan sistem.

6.2.1.1. Temas Açısı Ölçümleri

Yoğunlaşma sonrasında yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranının belirlenmesi için kullanılan PEF- MMA, PP - EVA, COC - PP, PP - PE, COC - HDPE yüzeylerinin denge, ilerleyen ve gerileyen temas açısı ölçümleri KSV CAM 200 cihazı yardımı ile ölçülmüştür. Denge temas açısı ölçümleri yüzeyler üzerinde 5 μ l hacminde saf su damlası dispenser kontrollü bir hipodermik şırınga-iğne yoluyla oluşturulmuştur. Damlanın hacmini arttırarak ve azaltarak ilerleyen (advancing) ve gerileyen (receding) temas açıları tespit edilmiştir. Metilen iyodür, α -bromonaftalen, etilen glikol ve formamit test sıvılarının yüzeyler üzerinde Hamilton şırınga yardımı ile oluşturulmasının ardından bu test sıvılarına ait temas açısı değerleri polimer yüzeylerin serbest yüzey enerjisinin hesaplanması amacıyla belirlenmiştir. Tüm temas açısı tespitleri çekilen damla fotoğraflarının bir şekil analiz programında değerlendirilmesi ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.6. KSV CAM 200 temas açısı ölçümü.

6.2.1.2. Optik Mikroskop

Yoğunlaşan sıvının Yüzey kaplama oranının yüzey özellikleri ile değişimi çalışmasında yoğunlaşmanın meydana geldiği polimer yüzeyler NIKON ECLIPSE LV 100 marka Optik mikroskop ile görüntülenmiştir. Yüzeylerin kaplama oranı optik mikroskopta alınan yüzey görüntüleri yardımı ile belirlenmiştir.



Şekil 6.7. NIKON ECLIPSE LV 100 optik mikroskop.

6.2.2. Damla Yoğunlaşması ile Su Damlası Büyümesi Denemeleri

Su damlası yoğunlaşması ile damla büyümesi denemeleri Teflon FEP 100'ün ince cam lama çift yönlü bant ile yapıştırılması ile elde edilen numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Teflon FEP 100 florokarbon reçineden yapılmış şeffaf ince bir filmidir.

Numunelerin temizliği aseton, etil alkol ve saf su ile gerçekleştirilmiş, temiz numuneler 50° C etüvde bekletilip ardından desikatöre koyulmuştur.

Su damlası yoğunlaşması ile damla büyümesi denemeleri 10 cm x 20 cm x 8 cm boyutlarında üzerinde kapağı bulunan şeffaf bir pleksiglass hücre içerisinde gerçekleştirilmiştir. Hücrenin taban kısmında dört tarafını bir bahçe gibi çevreleyen 2 cm' lik bir kısmı ve bu kısmın dört köşesine yerleştirilmiş metal ayaklar bulunmaktadır. Bu sayede KSV CAM 200 cihazında yan profil görüntüsünün kaydedilmesi sırasında sabit ve düz bir şekilde durabilmektedir.

Hücrenin üst kısmına kapağı ile arasında dış ortam ile arasında hava alışverişini engellemek amacıyla lastik kauçuk bally ile yapıştırılmıştır. Pleksiglass hücre ve kapağının temizliği önce saf su ile daha sonra etanol ile silerek ardından kurumaya bırakılarak gerçekleştirilmiştir

Yoğunlaşmanın gerçekleşebilmesi için soğuk bir yüzey gerekliliği söz konusudur. Soğuk yüzeyler, yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranının yüzey özellikleri ile değişimi denemelerinde kullanılan Julabo MV - F12 markalı sirkülatör ve bakır soğutucu kullanılarak sağlanmıştır. Bu denemelerde yüzey sıcaklığının daha düşük olması sebebi ile sirkülatörün sıfırdan küçük derecelerde sıcaklık değeri sağlaması gerekmektedir. Bu nedenle sirkülatörün içerisine 30% etilen glikol-su karışımı ilave edilmiştir. Sirkülatördeki soğuk etilen glikol-su karışımı hortumlar ile bakır soğutucuya ulaşmış ve bakır soğutucu üzerindeki bakır plakalar yardımı ile de numune yüzeyinin soğuması sağlanmıştır.

Numunelerin pleksiglass hücre içerisinde soğuyabilmesi için 4 cm x 4 cm x 0,4 cm boyutlarında 3 adet bakır plaka kullanılmıştır. Kullanılan bakır plakalardan biri hücrenin tabanına, diğeri ise KSV CAM 200 cihazından görüntü alınabilmesi için tabandaki bakır plakanın üzerine yerleştirilmiştir bir diğeri ise bakır soğutucunun üzerine ve pleksiglass hücrenin tabanında bulunan bakır plakanın altına yerleştirilmiştir. Hücrenin tabanında bu boyutlara uygun çerçeve şeklinde bir boşluk bulunmaktadır. Bakır plaka bu boşluğa yerleştirilmiş olup yerleştirildikten sonra plakanın kenar kısımlarında oluşan boşluklar Lightfix Acrylic Sealent marka çekomastik ile ortam ile hava akımı olmasını engellemek için kapatılmıştır. Çekomastik nemden etkilenecek belirli süre sonunda aynı etkisini gösterememektedir. Deneme öncelerinde ve sonralarında bu kısımlar kontrol edilmiş olup, boşluk yaratması durumunda çekomastik sürme işlemi tekrarlanmıştır.

Bakır soğutucunun üst kısmına yerleştirilen bakır plaka haricindeki kısımları ortam ile ısı alış verişini engellemek için cam yünü ve izolasyon malzemesi ile izole edilmiştir. Tüm bakır kısımlar her deneme öncesinde nem etkisi ile yüzeylerinde oluşan tabakayı temizlemek ve yüzeylerde pürüz kalmasının ısı aktarımını engellenmesini önlemek amacı ile English Abrasives, Atlas Brand P180C marka su geçirmez zımpara kağıdı ile zımparalanmıştır

Sirkülatörden belirli sıcaklık değerlerine ayarlanan 30% etilen glikol – su karışımı 1 cm çaplı hortumlar yardımı ile bakır soğutucuya taşınmaktadır. Hortumlar içerisinden geçen soğuk su nedeni ile hortum yüzeylerinde yoğunlaşma ile meydana gelen su damlalarının etrafa vereceği zararı önlemek ve ısı izolasyonu sağlamak amacı ile hortumlar izolasyon malzemesi ile kapatılmıştır.

Numune yüzeyinin ve bakır plakanın sıcaklıkları deney sistemine en uygun olan yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranının yüzey özellikleri ile değişimi denemelerinde kullanılan TP SENIES TP-01 marka K tipi termoçift yardımı ile ölçülmüş olup ölçülen sıcaklık değerleri CEM DT 613 marka termometrede görüntülenmiştir. İki adet termoçift takılabilme özelliğine sahiptir. Böylelikle 2 sıcaklık değerini aynı anda gösterebilmektedir. Bu sayede numunenin yerleştirildiği bakır plakanın yüzeyinin ve numunenin yüzeyinin sıcaklığı aynı anda görülebilmekte

ve sıcaklık kontrolünün sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilebilmektedir. Hücreye termoçiftlerin yerleştirilmesi için ön kısmından iki adet delik delinmiştir.

Hücre ve bakır soğutucu sistemi bir tahta destek üzerinde bulunmaktadır. Bu destek KSV CAM 200 cihazına tüm sistemin yerleştirilebilmesi ve deneme esnasında sistemin düzgün durabilmesi amacı ile kullanılmaktadır. Desteğin yüksekliği cihazdan görüntü alabilme mesafesine göre ayakları yardımı ile ayarlanabilmektedir.

Sirkülörde elde edilen soğuk etilen glikol-su karışımı hortumlar yardımı ile bakır soğutucuya taşınmış ve bakır plakalar ile de en üst yüzeyde soğuk bir yüzey elde edilmesi sağlanmıştır. Elde edilen soğuk yüzeyler sayesinde belirli bağıl nem koşullarında yüzeylerde sıcaklıklar çığlenme sıcaklıklarının altına düştüklerinde damla yoğunlaşması gerçekleşmiş ve bu sürede yüzeyde oluşturulan su damlasının büyümesinin takibi sağlanmıştır.

6.2.2.1. Bağıl Nemin Kontrol Edilmesi

Bağıl nemin kontrolü desen geometrisinin değişiminin buharlaşma hızına etkisinin araştırıldığı deneme koşullarındaki şekilde sağlanmıştır. Doygun tuz çözeltisi olarak 98% bağıl nem sağlayan Merck KH_2PO_4 tuz çözeltisi kullanılmıştır.

İki adet Alüminyum folyo kaba hazırlanan doymuş tuz çözeltisi konulduktan sonra çözeltiler hücre içerisine hücrenin iki ucuna gelecek şekilde yerleştirilmiştir.

Bağıl nemin ve sıcaklığın kontrolü için buharlaşma denemelerinde kullanılan TFA marka termo- higrometre kullanılmıştır.

TFA marka termo-higrometrenin hücre içindeki bağıl nem ve sıcaklık değerini kontrol etme amaçlı $-10^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}$ sıcaklık, 10%- 99% bağıl nem çalışma aralığına sahip hem göstergenin bulunduğu kısmın sıcaklık bağıl nemini hem de ucundaki probu sayesinde probun bulunduğu bölgenin sıcaklık ve bağıl nemini ölçüp gösteren

yine TFA marka problu termo higrometre kullanılmıştır. Termo-higrometrenin prob kısmı h¼cre i¼erisine yerleştirilmiştir.



şekil 6.8. Problu TFA marka termo-higrometre.

Ortamin bağlı nem ve sıcaklık değerini ¼l¼mek i¼in ¼ift g¼stergeli problu TFA nın ¼l¼t¼ę¼ nem değerini kontrol etmek i¼in TESTO 615 marka termo- higrometre kullanılmıştır. Sıcaklık ¼alıřma aralığı 0 ¼C ile 50 ¼C, bağlı nem ¼alıřma aralığı ise 5% - 95% aralığındadır.



şekil 6.9. Testo 615 termo- higrometre.

Termo-higrometrelerin sıcaklık ve bağıl nem çalışma aralığı değerleri Çizelge 6.2' de gösterilmektedir.

Çizelge 6.2. Kullanılan higrometrelerin sıcaklık ve bağıl nem değerleri.

	Sıcaklık		Bağıl Nem	
	TFA	-10 °C	+60°C	10%
Problu TFA	-10 °C	+60°C	10%	99%
TESTO 615	0 °C	+50 °C	5%	95%

Çözeltilerin yerleştirilmesinin ardından nem kontrolünün sağlanabilmesi için TFA termo-higrometre ve problu TFA' nın prob kısmı hücreye yerleştirilmiştir.

Yoğunlaşma denemesinin gerçekleştirileceği temiz numuneler ayrı bir pleksiglass hücrede 98% bağıl nem değerinde buharlaşma denemelerindeki şekilde hazırlanan KH_2PO_4 doygun tuz çözeltileri ile sağlanmış olup bu hücre içerisine en az bir gece bekletilmek üzere yerleştirilmiştir.

Bağıl nem dengesi sağlanmış yoğunlaşma denemesinin gerçekleştirileceği pleksiglass hücredeki bakır plakanın yüzey sıcaklığı 2°C olacak şekilde sirkülator sıcaklığı ayarlanmış olup. Bakır yüzey bu sıcaklık değerine soğurken yüzeyinde yoğunlaşma meydana gelmektedir. Yoğunlaşmanın meydana gelmesi nedeni ile ortamda bulunan buhar molekülleri sıvı faza geçmektedir. Bu nedenden dolayı ortamın bağıl neminde bir düşüş söz konusu olmaktadır. 99% bağıl nem sağlanan ortamda denemeler süresince bağıl nem düşüşü 4%-12% olarak gözlenmiştir.

6.2.2.2. KSV CAM 200' de Damla Yoğunlaşması ile Su Damlası Büyümesi Denemeleri

Damla yoğunlaşması ile su damlası büyümesi denemelerinde pleksiglass hücre, bakır soğutucu, bakır plakalar ve tahta ayaktan oluşan yoğunlaşma sistemi KSV CAM 200 cihazına yerleştirilmektedir. Hamilton marka şırınga ile $\sim 4^{\circ}\text{C}$ su damlası 1 μl hacminde Teflon FEP 100 yüzeyinde oluşturulmasının ardından Teflon FEP 100 yüzeyi sirkülatör ile sıcaklık dengesi sağlanan bakır plaka üzerine bakır plaka ile tamamen temas edecek şekilde plastik cımbız yardımı ile yerleştirilmiştir. Numunenin bakır yüzeyine yerleştirildikten sonra yoğunlaşmanın meydana gelmesi ile büyümesi takip edilen su damlasının etrafında oluşan diğer damlalar ile birleşene kadar belirli zaman aralıklarıyla hem yan profilden KSV CAM 200 ile hem de üst profilden Imaging Source-DMK 21F04 marka dijital kamera ile görüntü alınarak kaydedilmiştir.

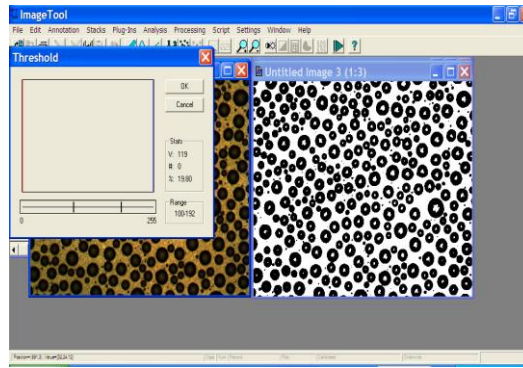
KSV CAM 200 cihazında denemeler süresince alınan görüntülerden cihazın kendi yazılımı sayesinde temas açısı, damla hacmi, temas yarıçapı ve yükseklik değerleri hesaplatılıp sonuçlar için gerekli veriler alınmıştır.



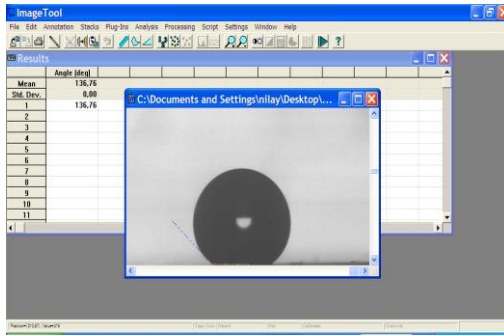
Şekil 6.10. Damla yoğunlaşması ile su damlası büyümesi denemelerinin gerçekleştirildiği sistem.

6.3. Görüntü İşleme ve Analiz Programı (UTHSCSA Image Tool Program)

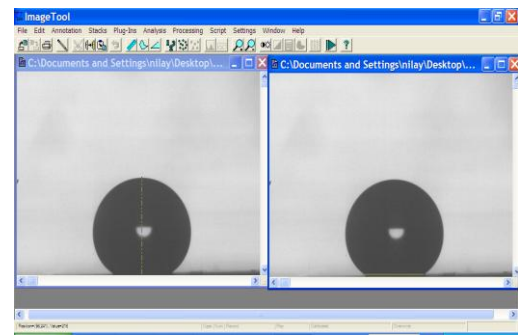
UTHSCSA görüntü işleme ve analiz programı Microsoft Windows 9x, Windows ME veya Windows NT işletim sistemi ile uyumlu bağımsız şekilleri işleme ve analiz programıdır. Gri ölçekli ve renkli şekiller programda açılabilir, ekranda görüntülenir, işlenir, analiz edilir, sıkıştırıp kaydedilir ve çıktı alınabilir.



a)



b)



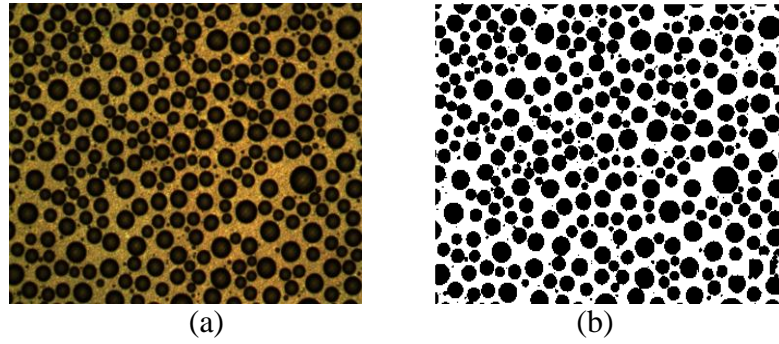
c)

Şekil 6.11. Görüntü işleme ve analiz programında a) yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranı belirlenmesi b) temas açısı c) yükseklik, h ve temas yarıçapı, r_b ölçümü.

Bu program kullanılarak optik mikroskopta polimer yüzeylerin alınan görüntülerinin siyah beyaz hale dönüştürülmesi ile yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranı değerleri belirlenmiştir ve buharlaşma ve yoğunlaşma denemelerindeki damlaların temas yarıçapı, açıları ve yükseklikleri belirlenmiş, daha

sonra gerekli hesaplamalar yapılarak grafikler çizilmiştir. KSV CAM 200 cihazının hassas bir ölçüm yaptığı sonucuna varılmıştır.

Yoğunlaşma sonrasında yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranının belirlenebilmesi için polimer yüzeylerden COC-HDPE yüzeyine ait optik mikroskop görüntüsü ve UTHSCSA görüntü işleme ve analiz programında elde edilen siyah beyaz (threshold) görüntüsü Şekil 6.12' de görülmektedir.



Şekil 6.12. Yoğunlaşma sonrasında sırası COC - HDPE yüzeylerinde oluşan damlaların (a) 50x büyütmede çekilmiş optik mikroskop görüntüsü, (b) Yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranının belirlenmesi amacı ile kullanılan optik mikroskop görüntülerinin siyah-beyaz (treshold) hali.

7. BULGULAR ve TARTIŞMA

7.1. Buharlaşma Denemeleri (Mikro desenli yüzeylerin üzerindeki su damlası buharlaşma hızı denemeleri)

7.1.1. Desen çapı Değişiminin Damla Buharlaşma Hızına Etkisi

Kenardan kenara mesafe (s) ve yükseklik (h) değerleri aynı veya oldukça yakın, desen çapı farklı 4 adet numune seçilerek seçilen numunelerde 5 μL su damlası ile denemeler gerçekleştirilmiştir. Numunelerin desen çapı, kenardan kenara mesafe, yükseklik değerleri Çizelge.7.1' de verilmiştir.

Çizelge 7.1. Numunelere ait desen çapı, kenardan kenara mesafe, yükseklik, s/d, denge temas açısı değerleri.

Numune	Desen Çapı d (μm)	Kenardan Kenara Mesafe s (μm)	Yükseklik h (μm)	s/d	Denge Temas Açısı θ , °
GYTE 41	9,56	25,00	31,79	2,62	165 ° \pm 2
GYTE 44	15,44	25,00	34,40	1,62	162° \pm 2
GYTE 45	19,85	24,26	32,10	1,22	160 ° \pm 2
GYTE 46	25,00	24,26	32,22	0,97	157° \pm 2

Her bir numune için üç adet deneme gerçekleştirilmiş ve üç deneme sonucunda elde edilen $dV^{2/3} / dt$ verilerinin ortalama değerleri ile sonuç grafiği çizilmiştir. Burada her bir numuneye ait ortalama $dV^{2/3} / dt$ değerine en yakın denemeye ait bulgular verilmektedir. Numuneler üzerindeki 5 μL su damlasının buharlaşması için KSV CAM 200 cihazından elde edilmiş deneysel veriler (7.2) - (7.5) numaralı

çizelgelerde verilmektedir. Yer sıkıntısı olduğundan dolayı tüm veriler çizelgelerde gösterilememiştir ancak çizilen grafikler tüm verileri kapsamaktadır.

Damla yüksekliği h , temas yarı çapı r_b , denge temas açısı θ_e , damla hacmi V ile simgelemiş olup çizelgelerde bu simgelerle belirtilmektedir.

Çizelge 7.2. Desen çapı $9,56 \mu\text{m}$ olan numuneye ait deneysel h , r_b , θ_e , V , $V^{2/3}$ verileri.

t (s)	h (mm)	r_b (mm)	θ_e (°)	V (μl)	$V^{2/3}$ (mm^2)
0	1,921	0,522	161,2	5,138	2,978
300	1,856	0,487	161,7	4,553	2,747
900	1,702	0,465	158,2	3,472	2,293
1500	1,525	0,462	152,6	2,531	1,857
2100	1,338	0,427	149,2	1,721	1,436
2700	1,140	0,355	148,6	1,034	1,023
3300	0,898	0,266	149,6	0,492	0,623
3900	0,545	0,165	147,2	0,109	0,228

Çizelge 7.3. Desen çapı $15,44 \mu\text{m}$ olan numuneye ait deneysel h , r_b , θ_e , V , $V^{2/3}$ verileri.

t (s)	h (mm)	r_b (mm)	θ_e (°)	V (μl)	$V^{2/3}$ (mm^2)
0	1,910	0,535	161,6	5,180	2,994
300	1,849	0,543	158,8	4,719	2,813
900	1,720	0,552	153,7	3,846	2,455
1500	1,575	0,558	148,2	3,036	2,097
2100	1,410	0,563	141,7	2,285	1,735
2700	1,237	0,537	136,5	1,601	1,369
3300	1,064	0,442	138,3	0,987	0,991
3900	0,851	0,342	138,5	0,491	0,622
4500	0,529	0,217	138,0	0,120	0,243

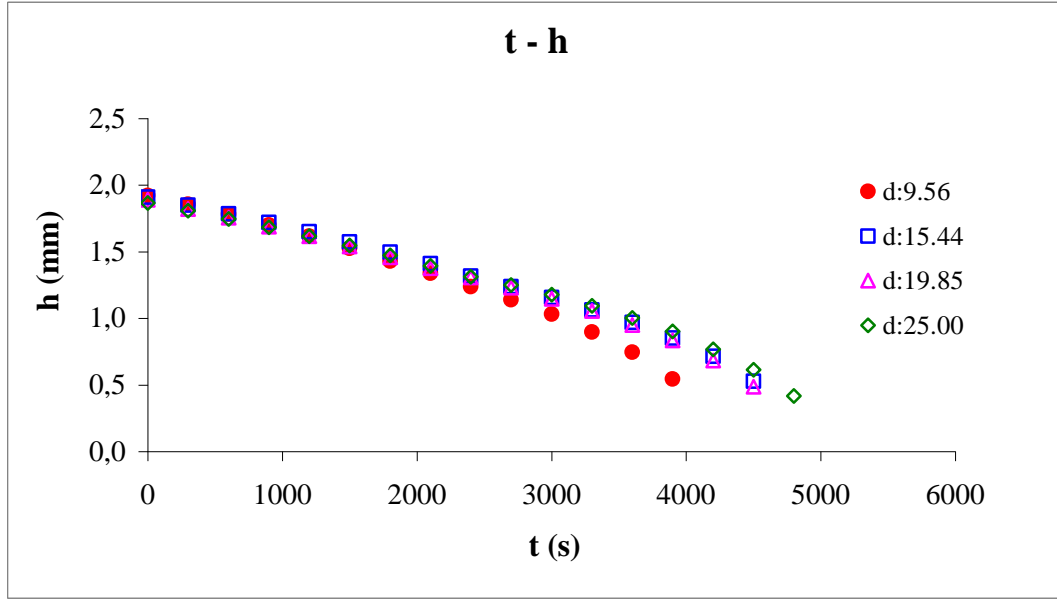
Çizelge 7.4. Desen çapı 19,85 μm olan numuneye ait deneysel h , r_b , θ_e , V , $V^{2/3}$ verileri.

t (s)	h (mm)	r_b (mm)	θ_e (°)	V (μl)	$V^{2/3}$ (mm^2)
0	1,891	0,527	160,9	4,971	2,913
300	1,822	0,542	157,4	4,489	2,721
900	1,689	0,547	152,3	3,618	2,357
1500	1,541	0,554	146,6	2,830	2,001
2100	1,377	0,550	141,0	2,109	1,645
2700	1,232	0,458	143,7	1,445	1,278
3300	1,056	0,386	143,2	0,892	0,927
3900	0,834	0,298	143,4	0,433	0,572
4500	0,487	0,219	133,1	0,101	0,217

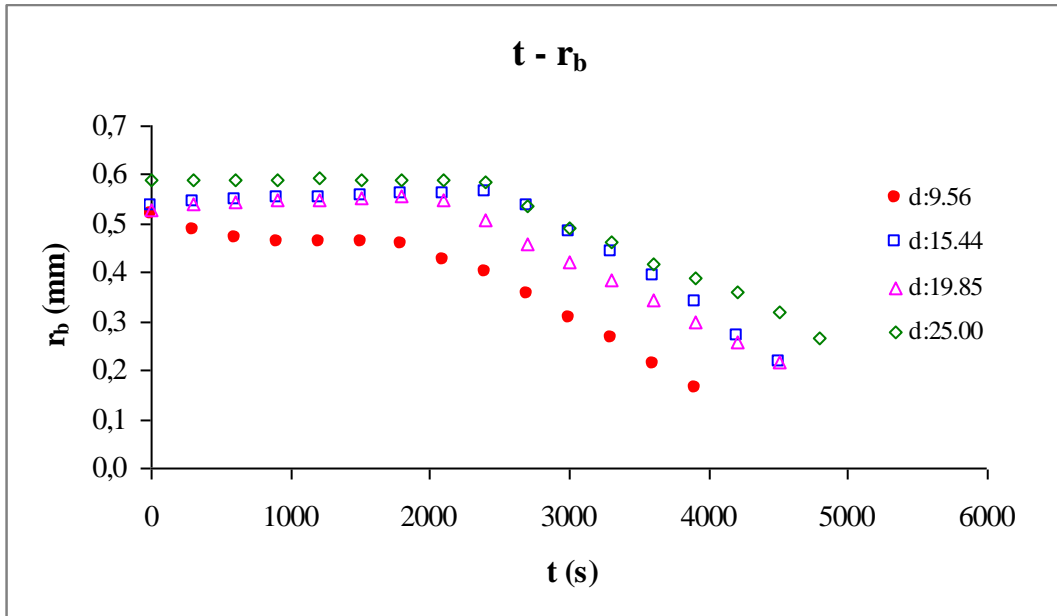
Çizelge 7.5. Desen çapı 25,00 μm olan numuneye ait deneysel h , r_b , θ_e , V , $V^{2/3}$ verileri.

t (s)	h (mm)	r_b (mm)	θ_e (°)	V (μl)	$V^{2/3}$ (mm^2)
0	1,866	0,591	155,6	4,963	2,910
10	1,747	0,592	151,5	4,119	2,570
20	1,618	0,593	146,8	3,343	2,236
30	1,473	0,592	141,7	2,621	1,901
40	1,313	0,585	135,5	1,959	1,566
50	1,179	0,491	138,0	1,348	1,220
60	1,002	0,417	137,6	0,826	0,880
70	0,768	0,362	130,3	0,412	0,554
80	0,418	0,268	112,4	0,084	0,192

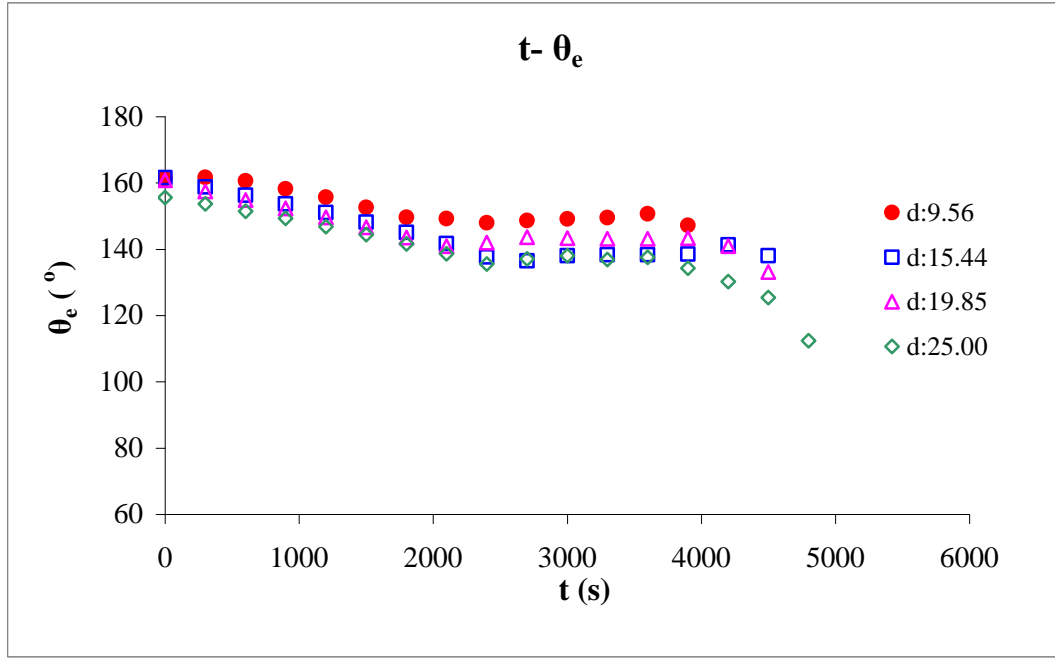
Bütün analiz edilmiş veriler kullanılarak 5 μl su damlası için çizilen (r_b -t), (θ -t), (V -t) ve ($V^{2/3}$ -t) grafikleri (7.1)- (7.5) numaralı şekillerde gösterilmektedir.



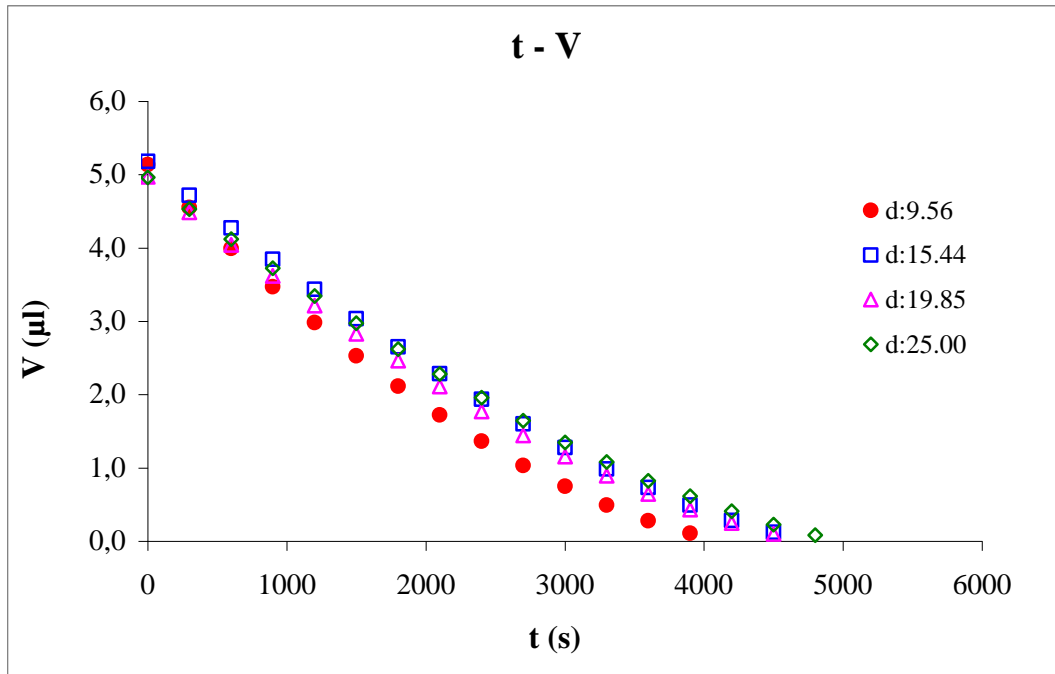
Şekil 7.1. Desen çapı 9.56 μm , 15.44 μm , 19.85 μm , 25.00 μm olan numuneler üzerindeki su damlası yüksekliğinin zamanla değişim grafiği.



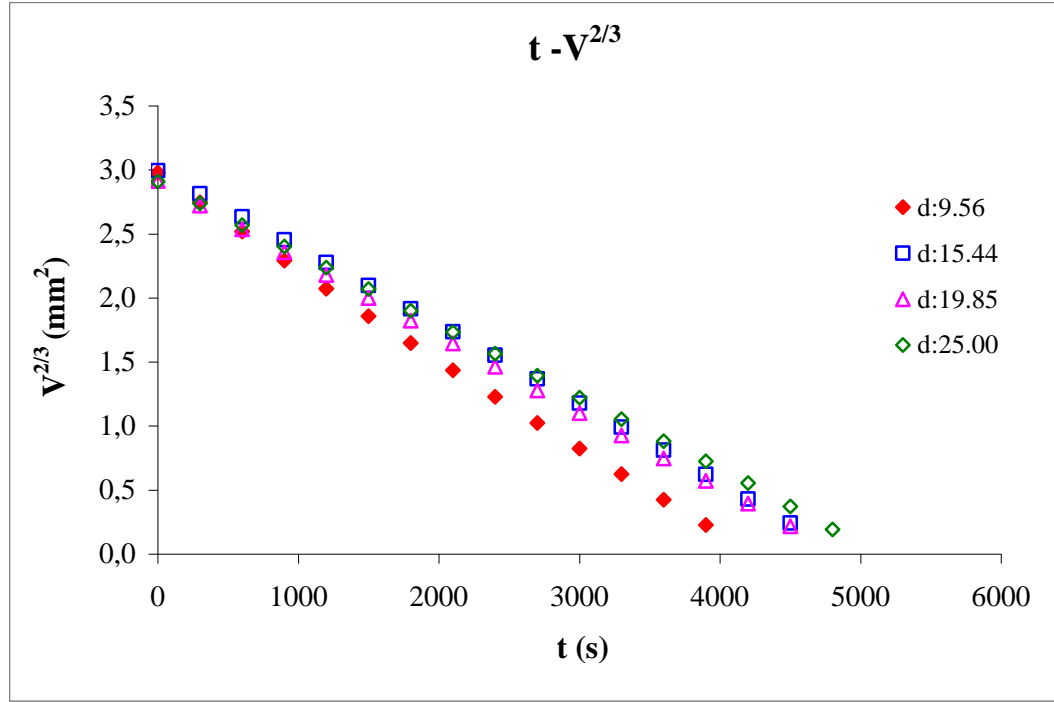
Şekil 7.2. Desen çapı 9.56 μm , 15.44 μm , 19.85 μm , 25.00 μm olan numuneler üzerindeki su damlasının temas yarıçapının zamanla değişim grafiği.



Şekil 7.3. Desen çapı 9.56 μm , 15.44 μm , 19.85 μm , 25.00 μm olan numuneler üzerindeki su damlasının temas açısının zamanla değişim grafiği.



Şekil 7.4. Desen çapı 9.56 μm , 15.44 μm , 19.85 μm , 25.00 μm olan numuneler üzerindeki su damlası hacminin zamanla değişim grafiği.



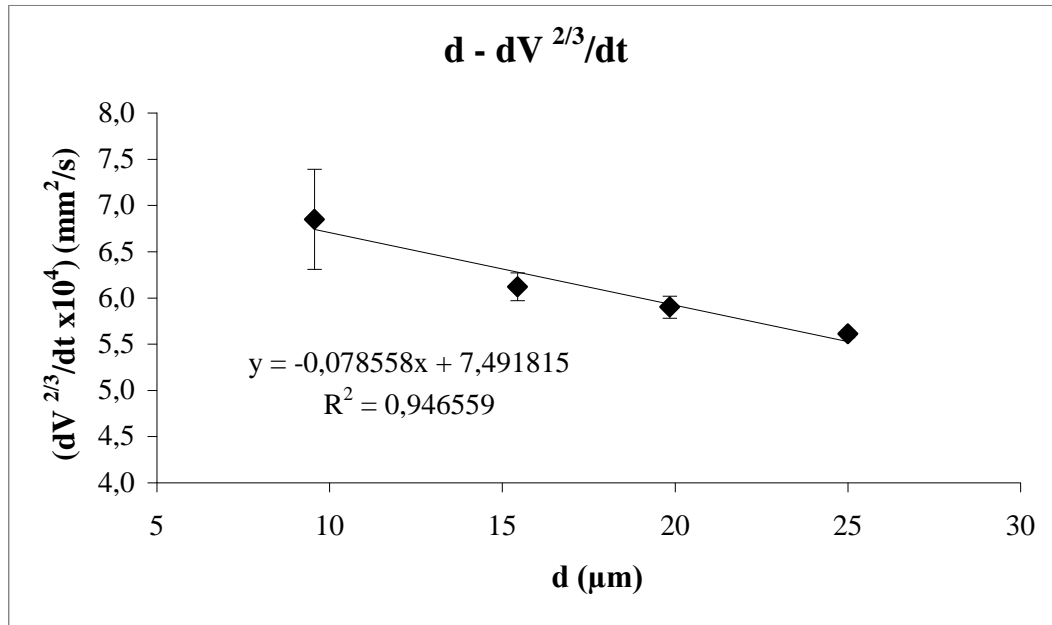
Şekil 7.5. Desen çapı 9.56 μm , 15.44 μm , 19.85 μm , 25.00 μm olan numunelerdeki $V^{2/3}$ 'ün zamanla değişim grafiği.

Numuneler üzerinde damlanın buharlaşması belirli bir süre temas açısının azalarak temas yarıçapının sabit kaldığı sabit temas yarı çapı modelinde, belirli süre sonunda ise temas yarıçapının azaldığı temas açısının sabit kaldığı sabit temas açısı modelinde yani karışık (mixed) modelinde gerçekleşmektedir.

Farklı desen çapındaki numunelerin yüzeyindeki su damlasının buharlaşma hızı, her deneme için $V^{2/3}$ -t grafiklerinin çizdirilmesi ve bu grafiklere ait eğim değerlerinin hesaplanması ile belirlenmiştir. Numuneler için hesaplatılan $V^{2/3}$ -t grafiklerinin eğim ve R^2 değerleri Çizelge 7.6'da verilmektedir. Her bir numune için hesaplatılan eğim değerlerinin ortalaması alınarak desen çapı ile buharlaşma hızının ilişkisi grafiğe geçirilmiştir ve elde edilen grafik Şekil 7.6 'da görülmektedir.

Çizelge 7.6. Desen çapı, $dV^{2/3}/dt$ ve R^2 değerleri.

Numune	Desen Çapı $d(\mu\text{m})$	$(dV^{2/3}/dt)$ (mm^2/s)	R^2
GYTE 41	9,56	$7,03 \times 10^{-4}$	0,999
		$7,29 \times 10^{-4}$	0,999
		$6,22 \times 10^{-4}$	0,999
	Ortalama	$6,85 \times 10^{-4} \pm 0,54 \times 10^{-4}$	-
GYTE 44	15,44	$6,27 \times 10^{-4}$	0,999
		$5,98 \times 10^{-4}$	0,999
		$6,11 \times 10^{-4}$	0,999
	Ortalama	$6,12 \times 10^{-4} \pm 0,15 \times 10^{-4}$	-
GYTE 45	19,85	$5,98 \times 10^{-4}$	0,999
		$5,98 \times 10^{-4}$	0,999
		$5,75 \times 10^{-4}$	0,999
	Ortalama	$5,90 \times 10^{-4} \pm 0,12 \times 10^{-4}$	-
GYTE 46	25	$5,64 \times 10^{-4}$	0,999
		$5,63 \times 10^{-4}$	0,999
		$5,56 \times 10^{-4}$	0,999
	Ortalama	$5,61 \times 10^{-4} \pm 0,04 \times 10^{-4}$	-



Şekil 7.6. Desen çapı ile buharlaşma hızının değişimi grafiği.

Numunelerin desen çaplarının artması ile buharlaşma hızının azaldığı görülmektedir. Buharlaşma sırasında desen çapı daha fazla olan numuneler yüzeyinde su damlasının hava ile temas ettiği alan daha azdır. Bu durumda substratın buharlaşmaya etkisi artarak buharlaşmaya engel olmaktadır ve buharlaşma hızı azalmaktadır.

7.1.2. Kenardan Kenara Mesafe/Desen Çapı Değişiminin Buharlaşma Hızına Etkisi

Kenardan kenara mesafe (s) / desen çapı (d) oranı farklı 5 adet numune seçilerek seçilen numunelerde 5 μL su damlası ile denemeler gerçekleştirilmiştir. Numunelerin desenlerine ait çap uzunluğu, kenardan kenara mesafe, yükseklik değerleri Çizelge.7.7' de verilmiştir.

Çizelge 7.7. Numunelere ait desenlerin s/d, kenardan kenara mesafe, desen çapı, yükseklik, denge temas açısı değerleri.

Numune	s/d	Kenardan Kenara Mesafe s (μm)	Desen Çapı d (μm)	Yükseklik h (μm)	Denge Temas Açısı θ_e ($^\circ$)
GYTE 41	2,62	25	9,56	31,79	165 $^\circ$ ±2
GYTE 39	1,54	14,71	9,56	34,15	164 $^\circ$ ±2
GYTE 45	1,22	24,26	19,85	32,1	160 $^\circ$ ±2
GYTE 38	1,08	10,29	9,56	33,94	159 $^\circ$ ±1
GYTE 46	0,97	24,26	25	32,22	157 $^\circ$ ±2

Her bir numune için üç adet deneme gerçekleştirilmiş ve üç deneme sonucunda elde edilen $dV^{2/3}/dt$ verilerinin ortalama değerleri ile sonuç grafiği çizilmiştir. Burada her bir numune için ortalama değere en yakın veriye ait bulgular verilmektedir.

s/d değeri 2.62, 1.22 ve 0.97 olan numunelere ait h, r_b , θ_e , V, $V^{2/3}$ verilerinin desen çapı 9.56 μm , 19.85 μm , 25 μm olan numunelere ait veriler ile aynı olması

sebebi ile bu bölümde s/d değeri 1.54 ve 1.08 olan numunelere ait veriler verilecektir.

Numuneler üzerindeki 5 μL su damlasının buharlaşması için KSV CAM 200 cihazından elde edilmiş deneysel veriler (7.8) ve (7.9) numaralı çizelgelerde verilmektedir. Yer sıkıntısı olduğundan dolayı tüm veriler çizelgelerde gösterilememiştir ancak çizilen grafikler tüm verileri kapsamaktadır.

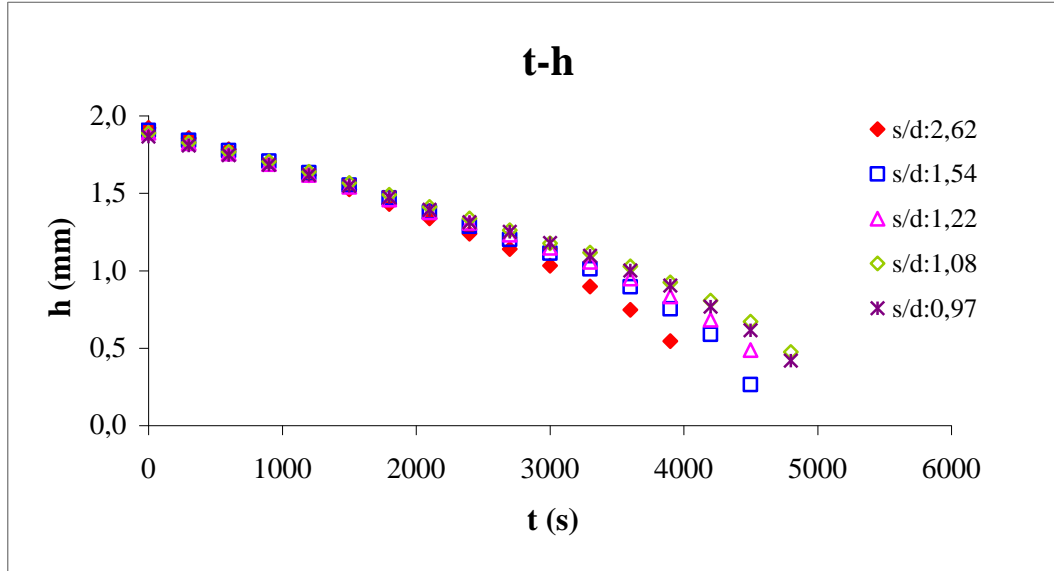
Çizelge.7.8. s/d değeri 1.54 olan numuneye ait deneysel h , r_b , θ_e , V , $V^{2/3}$ verileri.

t (s)	h (mm)	r_b (mm)	θ_e (°)	V (μl)	$V^{2/3}$ (mm^2)
0	1,906	0,558	159,3	5,169	2,990
300	1,842	0,560	157,0	4,686	2,800
900	1,706	0,569	151,5	3,787	2,430
1500	1,553	0,572	145,8	2,947	2,056
2100	1,379	0,573	139,2	2,175	1,679
2700	1,202	0,520	136,7	1,469	1,292
3300	1,012	0,452	133,4	0,877	0,916
3900	0,753	0,362	129,5	0,383	0,527
4500	0,265	0,281	84,7	0,042	0,121

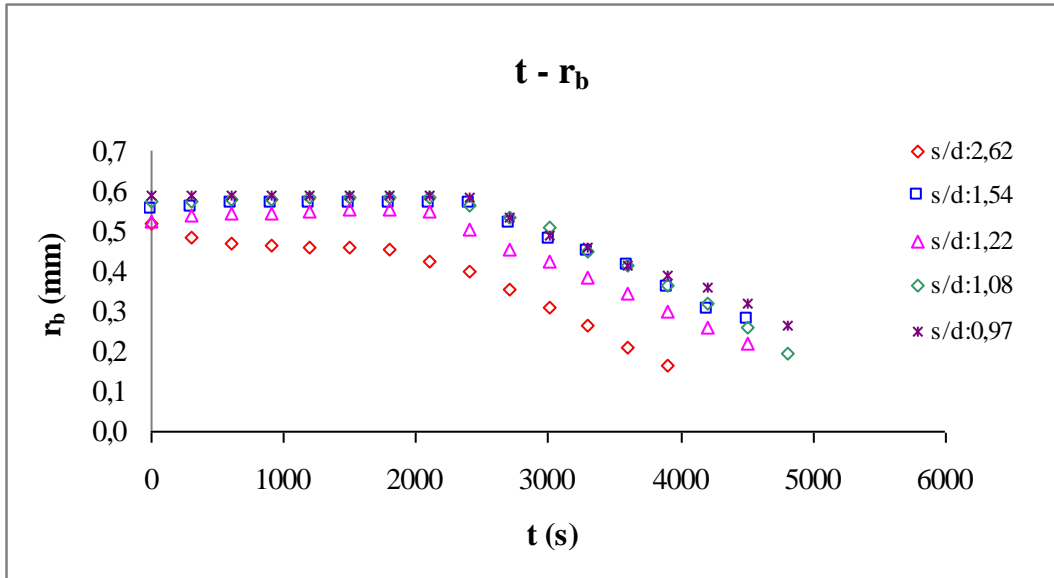
Çizelge 7.9. s/d değeri 1.08 olan numuneye ait deneysel h , r_b , θ_e , V , $V^{2/3}$ verileri.

t (s)	h (mm)	r_b (mm)	θ_e (°)	V (μl)	$V^{2/3}$ (mm^2)
0	1,888	0,575	157,2	5,074	2,953
600	1,767	0,580	152,6	4,202	2,604
1200	1,638	0,584	147,6	3,409	2,265
1800	1,491	0,585	142,2	2,675	1,927
2400	1,337	0,568	137,5	1,995	1,585
3000	1,177	0,510	136,1	1,372	1,235
3600	1,027	0,413	137,7	0,853	0,899
4200	0,808	0,318	138,0	0,409	0,551
4800	0,474	0,198	134,9	0,085	0,193

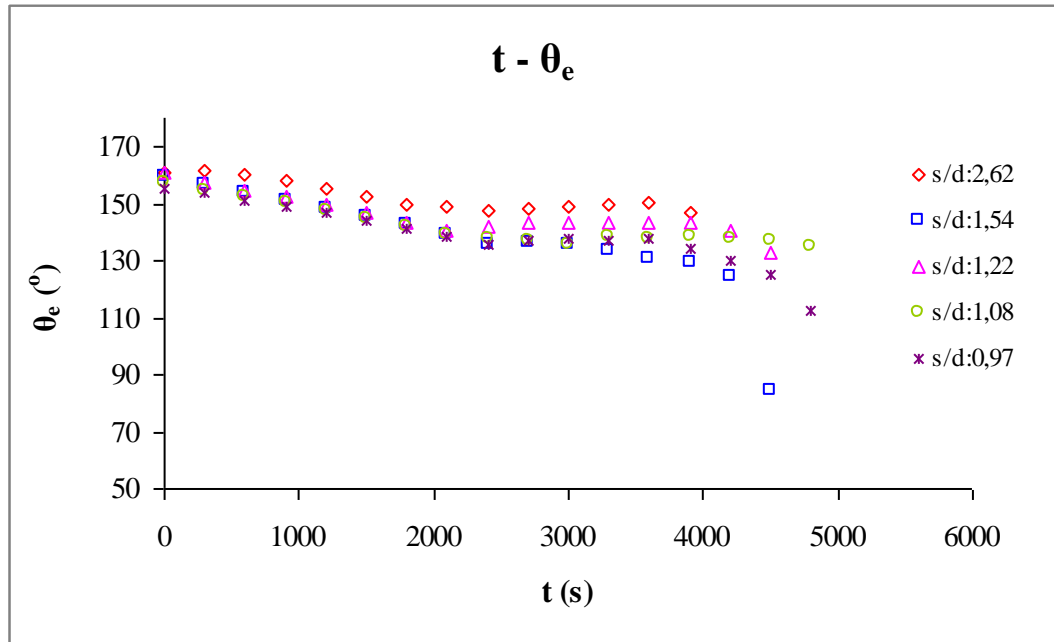
Bütün analiz edilmiş veriler kullanılarak 5 μ l su damlası için çizilen (r_b -t), (θ -t), (V -t) ve ($V^{2/3}$ -t) grafikleri (7.7)- (7.11) numaralı şekillerde gösterilmektedir.



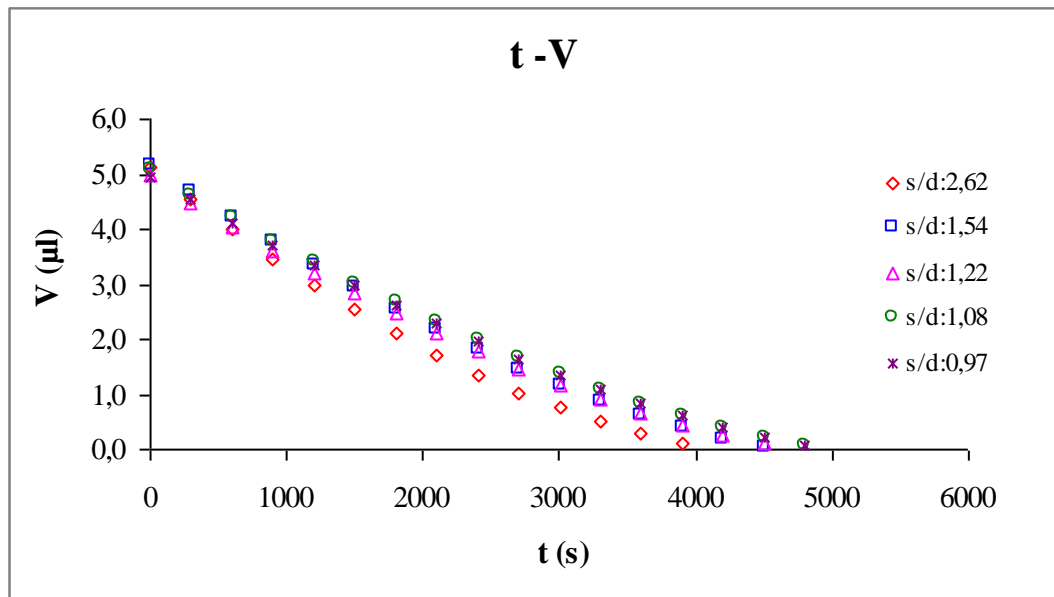
Şekil 7.7. s/d değeri 2.62, 1.54, 1.22, 1.08, 0,97 olan numuneler üzerindeki su damlasının yüksekliğinin zamanla değişim grafiği.



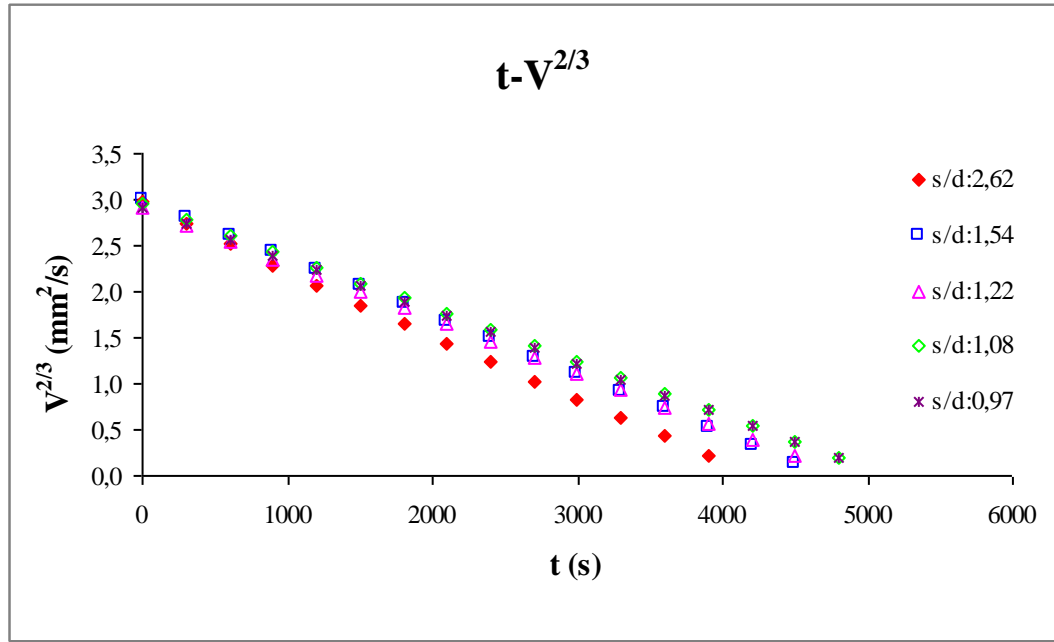
Şekil 7.8. s/d değeri 2.62, 1.54, 1.22, 1.08, 0,97 olan numuneler üzerindeki su damlasının temas yarıçapının zamanla değişim grafiği.



Şekil 7.9. s/d değeri 2.62, 1.54, 1.22, 1.08, 0.97 olan numuneler üzerindeki su damlasının temas açısının zamanla değişim grafiği.



Şekil 7.10. s/d değeri 2.62, 1.54, 1.22, 1.08, 0.97 olan numuneler üzerindeki su damlasının hacminin zamanla değişim grafiği.



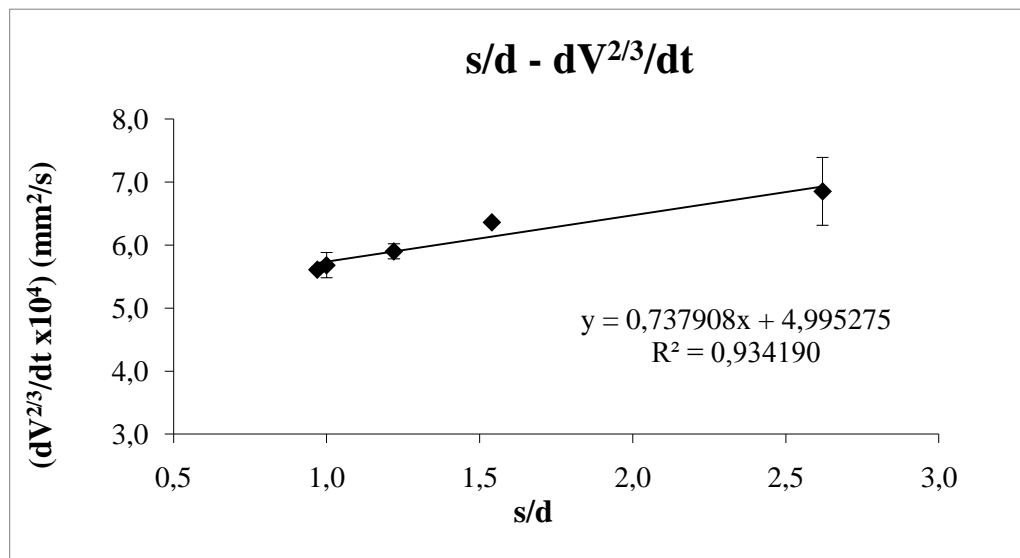
Şekil 7.11. s/d değeri 2.62, 1.54, 1.22, 1.08, 0,97 olan numuneler üzerindeki su damlasının $V^{2/3}$ ün zamanla değişim grafiği.

Numuneler üzerinde damlanın buharlaşması belirli bir süre temas açısının azalarak temas yarıçapının sabit kaldığı sabit temas yarıçapı modelinde, belirli süre sonunda ise temas yarıçapının azaldığı temas açısının sabit kaldığı sabit temas açısı modelinde yani karışık (mixed) modelinde gerçekleşmektedir.

Farklı s/d oranına sahip numunelerin yüzeyindeki su damlasının buharlaşma hızı, her deneme için $V^{2/3}$ -t grafiklerinin çizdirilmesi ve bu grafiklere ait eğim değerlerinin hesaplanması ile belirlenmiştir. Numuneler için hesaplatılan $V^{2/3}$ -t grafiklerinin eğim ve R^2 değerleri Çizelge.7.10 'da verilmektedir. Her bir numune için hesaplatılan eğim değerlerinin ortalaması alınarak desen çapı ile buharlaşma hızının ilişkisi grafiğe geçirilmiştir ve elde edilen grafik Şekil.7.12 'de görülmektedir.

Çizelge 7.10 s/d, $dV^{2/3}/dt$ ve R^2 değerleri.

Numune	s/d	$(dV^{2/3}/dt)$ (mm^2/s)	R^2
GYTE 41	2,62	$7,03 \times 10^{-4}$	0,999
		$7,29 \times 10^{-4}$	0,999
		$6,22 \times 10^{-4}$	0,999
	Ortalama	$6,85 \times 10^{-4} \pm 0,54 \times 10^{-4}$	-
GYTE 39	1,54	$6,41 \times 10^{-4}$	0,999
		$6,34 \times 10^{-4}$	0,999
		$6,33 \times 10^{-4}$	0,999
	Ortalama	$6,36 \times 10^{-4} \pm 0,04 \times 10^{-4}$	-
GYTE 45	1,22	$5,98 \times 10^{-4}$	0,999
		$5,98 \times 10^{-4}$	0,999
		$5,75 \times 10^{-4}$	0,999
	Ortalama	$5,90 \times 10^{-4} \pm 0,12 \times 10^{-4}$	-
GYTE 38	1,08	$5,52 \times 10^{-4}$	0,999
		$5,72 \times 10^{-4}$	0,999
		$5,81 \times 10^{-4}$	0,999
	Ortalama	$5,68 \times 10^{-4} \pm 0,2 \times 10^{-4}$	-
GYTE 46	0,97	$5,64 \times 10^{-4}$	0,999
		$5,63 \times 10^{-4}$	0,999
		$5,56 \times 10^{-4}$	0,999
	Ortalama	$5,61 \times 10^{-4} \pm 0,04 \times 10^{-4}$	-

Şekil 7.12. s/d oranı ile $dV^{2/3}/dt$ değişimi grafiği.

Kenardan kenara mesafe değerinin artışı ile buharlaşma hızı artan bir eğilim göstermektedir. Bunun nedeni, buharlaşmanın sadece yüzeyin üst kısmından değil aynı zamanda desenlerin arasındaki boşluklardan da gerçekleşmesidir.

Kenardan kenara mesafe (s)/ desen çapı (d) değerinin artışı ile de buharlaşma hızı artmaktadır. Bu oranın daha büyük olmasını sağlayan kenardan kenara mesafe değerinin büyüklüğü ya da desen çapı değerinin küçüklüğüdür. Desen çapı değerinin daha az olması buharlaşmayı hızlandıracağı gibi kenardan kenara mesafenin artışı da hava ile teması arttırdığından buharlaşmayı hızlandırma eğilimindedir

7.2. Yoğunlaşma Denemeleri

7.2.1. Yoğunlaşan Sıvının Yüzey Kaplama Oranının Yüzey Özellikleri ile Değişimi

Yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranının yüzey özellikleri ile değişimi denemelerinde kullanılan polimer yüzeylerin serbest yüzey enerjisi, yüzeyler üzerinde ölçülen metilen iyodür (MeI_2), α -bromonaftalen, formamit ve etilen glikol sıvılarına ait temas açısı değerleri kullanılarak (2.11) eşitliği ile hesaplanmış olup sonuçlar Çizelge 7.11' da verilmiştir.

Çizelge 7.11. Numunelerin metilen iyodür, α -bromonaftalen, formamit ve etilen glikol sıvıları ile elde edilen denge temas açısı ile hesaplanmış serbest yüzey enerjisi değerleri.

NUMUNE	θ_{MeI_2} (°)	$\theta_{\alpha\text{-bromonaftalen}}$ (°)	θ_{formamit} (°)	$\theta_{\text{etilen glikol}}$ (°)	Serbest yüzey enerjisi, γ (mJ/m ²)
PEF- MMA	96 ±1	89 ±1	102 ±1	101 ±1	11,1
PP – EVA	53 ±1	52 ±1	81 ±1	74 ±1	31,1
COC-PP	56 ±1	47 ±1	88 ±1	80 ±1	31,0
PP-PE	56 ±1	52 ±1	88 ±1	77 ±1	30,2
COC-HDPE	51 ±1	41 ±1	81 ±1	72 ±1	34,2

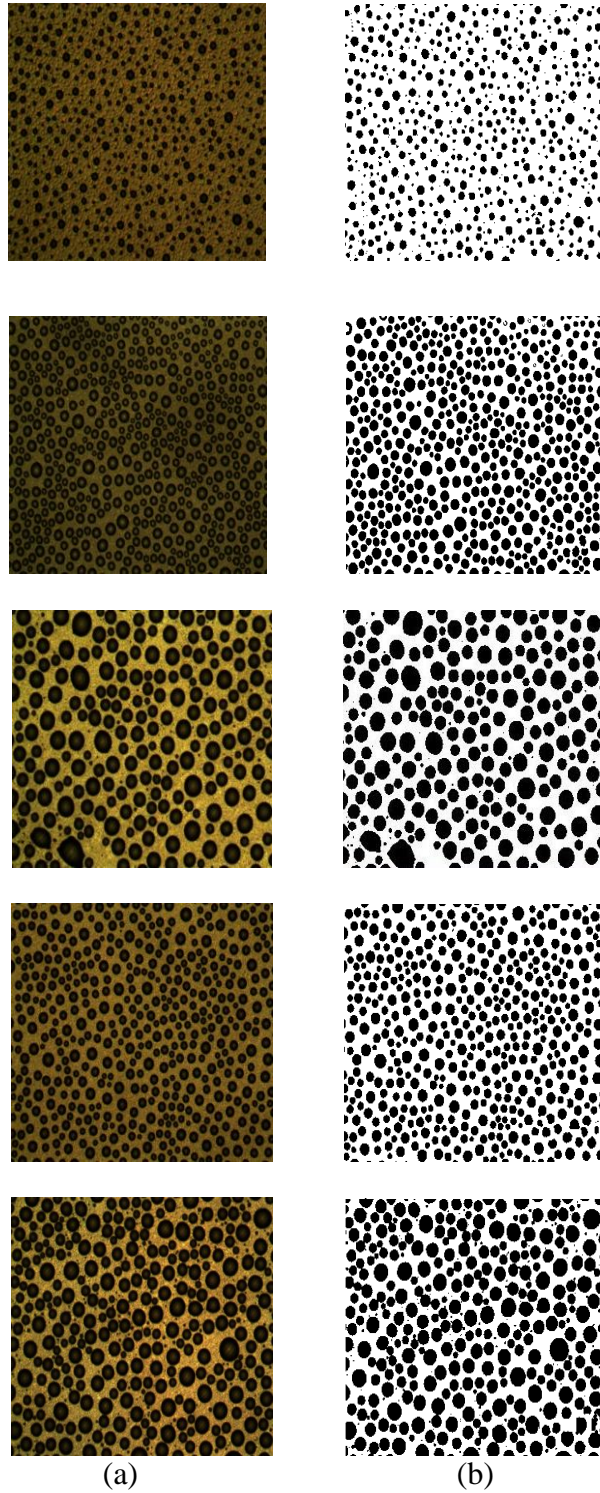
Polimer yüzeylerin denge, ilerleyen, gerileyen temas açıları KSV CAM 200 cihazında ölçülmüş olup temas açısı histeresis değeri (2.2) denklemi ile hesaplanmıştır. Numunelerin serbest yüzey enerjisi, su temas açısı, temas açısı histeresis ve yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranı kaplama oran Çizelge 7.12 ‘de görülmektedir.

Çizelge 7.12. Numunelerin Serbest Yüzey Enerjisi, Su Temas Açısı, Temas Açısı Histeresis, Yoğunlaşan Sıvının Yüzey Kaplama Oranı Değerleri.

NUMUNE	Serbest Yüzey Enerjisi γ (mJ/m ²)	Denge Temas Açısı θ_e (°)	İlerleyen Temas Açısı θ_a (°)	Gerileyen Temas Açısı θ_r (°)	Temas Açısı Histeresis CAH (°)	Yüzey Kaplama Oranı
PEF - MMA	11,1	119 ±1	121 ±1	88 ±1	33 ±2	0,2017 ± 0,0404
PP - EVA	31,1	112 ±1	118 ±1	83 ±1	35 ±2	0,4422 ± 0,0732
COC - PP	31,0	106 ±1	111 ±1	86 ±1	25 ±2	0,4685 ± 0,0435
PP - PE	30,2	105 ±1	107 ±1	83 ±1	24 ±2	0,3990 ± 0,0447
COC - HDPE	34,2	104 ±1	109 ±1	90 ±1	19 ±2	0,4891 ± 0,0653

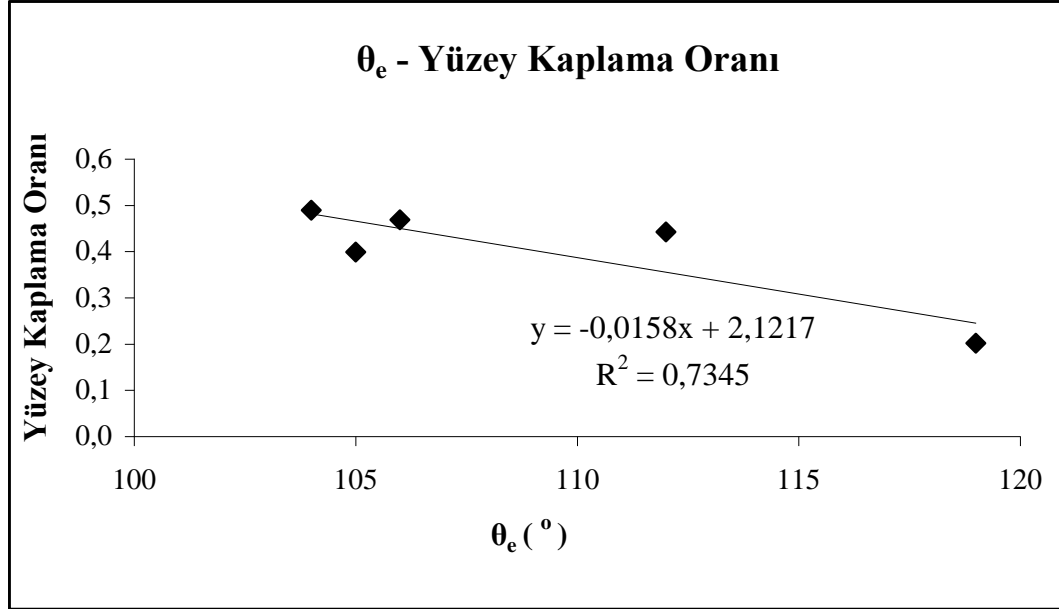
Yoğunlaşma sonrasında yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranının belirlenmesi için NIKON ECLIPSE LV 100 optik mikroskopta yüzeylerin görüntüleri çekilmiştir.

Optik mikroskopta çekilen görüntülerin UTHSCSA görüntü işleme ve analiz programında siyah beyaz halleri ile yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranı belirlenmiştir. Elde edilen görüntüler Şekil.7.13' de gösterilmiştir.

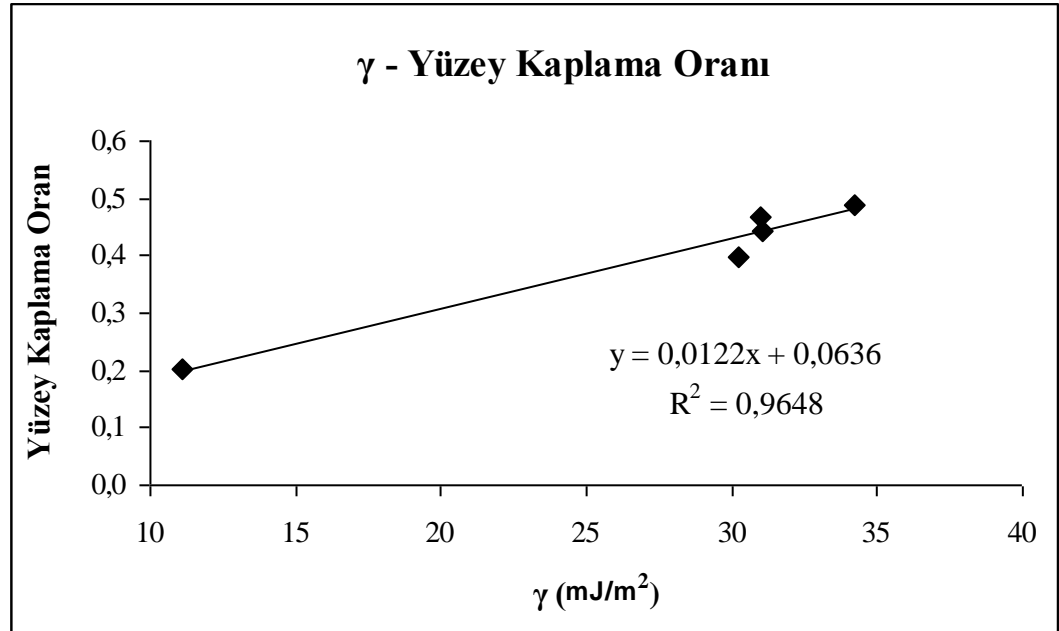


Şekil 7.13. Yoğunlaşma sonrasında sırası ile PEF- MMA, PP - EVA, COC - PP, PP-PE, COC - HDPE yüzeylerinde oluşan damlaların (a) 50x büyütmede çekilmiş optik mikroskop görüntüleri, (b)Yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranının belirlenmesi amacı ile kullanılan optik mikroskop görüntülerinin siyah-beyaz (treshold) halleri.

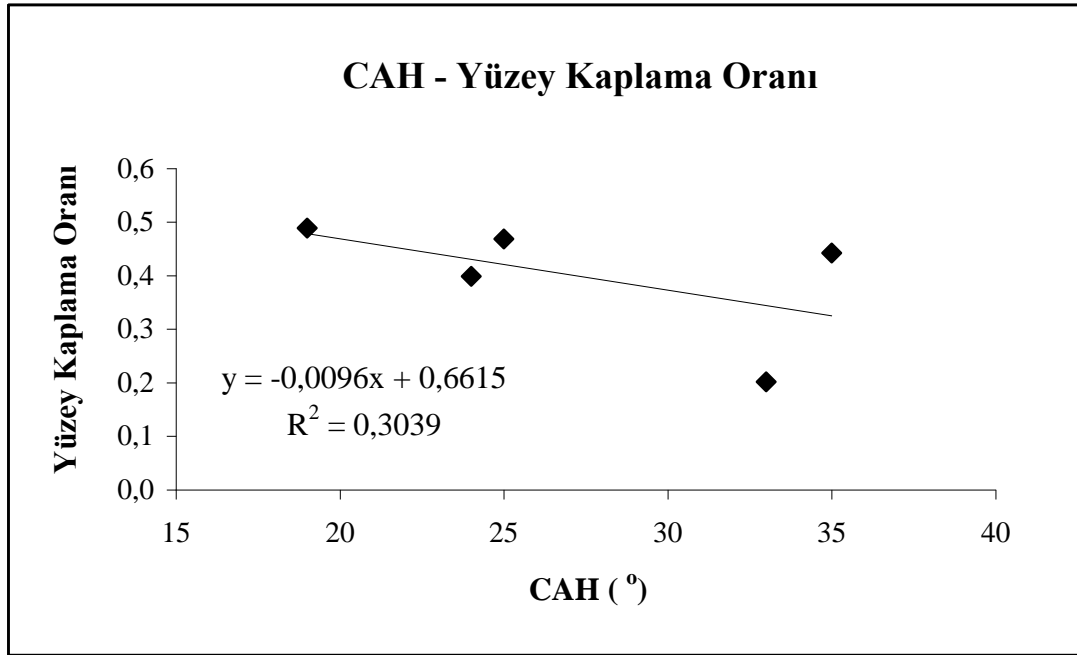
Numunelerin denge temas açısı, serbest yüzey enerjisi, ve temas açısı histeresis değerleri ile belirlenen yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranı değerleri grafiğe geçirilmiştir. Elde edilen grafikler Şekil (7.14) - (7.16) 'de görülmektedir.



Şekil 7.14. Denge temas açısı ile yüzey kaplama oranı değişimi grafiği.



Şekil 7.15. Serbest yüzey enerjisi ile yüzey kaplama oranı değişimi grafiği.



Şekil 7.16. Temas açısı histeresis ile yüzey kaplama oranı değişimi grafiği.

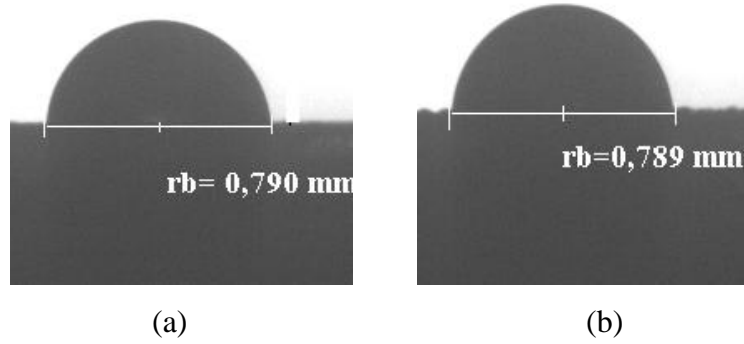
Denge temas açısının artışının ve temas açısı histeresisin artışının yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranına azaltıcı etkisi, serbest yüzey enerjisinin artışının ise yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranına arttırıcı bir etkisi olduğu görülmektedir. Yüksek denge temas açısına sahip yüzeylerin aynı zamanda düşük serbest yüzey enerjisine sahip olması nedeni ile temas açısının yüzey kaplama oranına azaltıcı etkisinin tersine serbest yüzey enerjisine arttırıcı etki göstermesi beklenen bir sonuçtur. Bu durum tek bir damlanın yoğunlaşma koşullarında büyümesinin takibinde yüksek temas açısına sahip yüzeylerin seçilmesi için temel olmuştur.

Düşük temas açısı, yüksek serbest yüzey enerjisine sahip yüzeyler yüzeyinde oluşan damlaları bir damla halinde tutma eğiliminde değil bir film halinde tutma eğiliminde olması nedeniyle yüzeyde daha fazla alan kaplamaktadır. Bu yüzden sonuçlar tutarlıdır.

7.2.2. Damla Yoğunlaşması ile Su Damlası Büyümesi

Sokuler et al., hegzadimetildisilazen kaplı hidrofobik kantilever üzerinde damla yoğunlaşması ile bir damlanın 15 saniyede $800 \mu\text{m}^3$ hacmine ulaştığı durum gözlemişler . Hidrofobik yüzey üzerinde gerçekleşen damla büyümesi takip edip difüzyon denklemlerine uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır [Sokuler, 2010]. Bu çalışma referans alınmıştır.

1 μl hacminde su damlasının Teflon FEP 100 yüzeyinde, 90% bağıl nem koşullarında oluşturulması ile numunenin yüzeyinin ve oluşturulan suyun sıcaklığının $\sim 5^\circ\text{C}$ ve yüzey ile yoğunlaşma hücrelerinin sıcaklık farkının $6-7^\circ\text{C}$ olduğu durumda denemeler gerçekleştirilmiştir. Denemelere ait KSV CAM 200 cihazında elde edilmiş h , r_b , θ_e , V , $V^{2/3}$ deneysel veriler Çizelge (7.13) - (7.14)' de görülmektedir.



Şekil 7.17. Damlanın (a) büyüme öncesi (b) büyüme sonundaki görüntüleri.

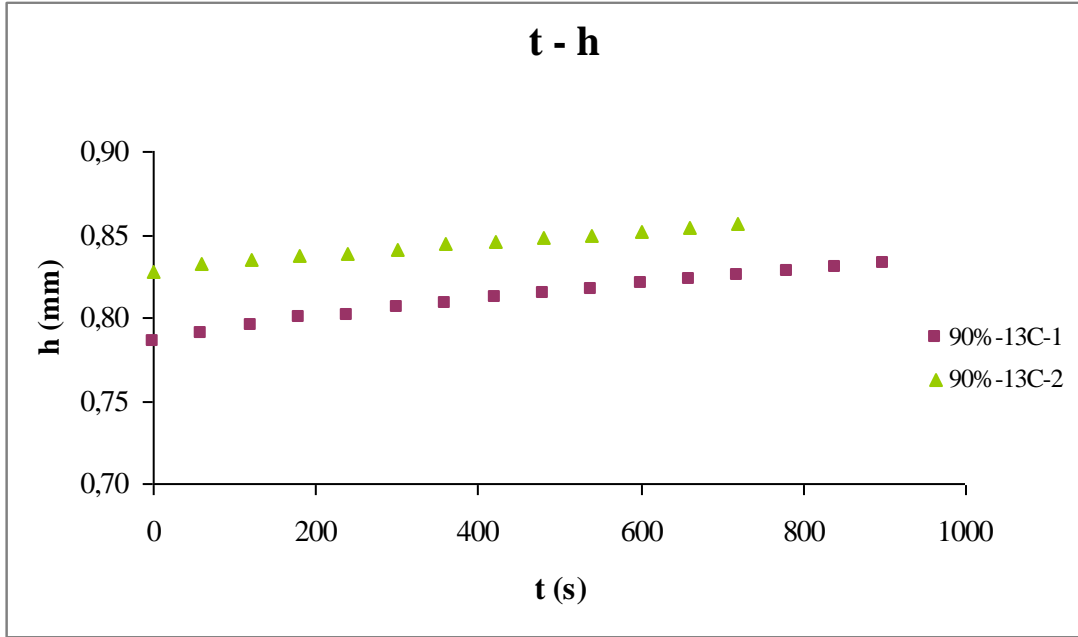
Çizelge 7.13. 90% bağıl nem 13 °C' de 1. denemeye ait h , r_b , θ_e , V , $V^{2/3}$ deneysel veriler.

t (s)	h (mm)	r_b (mm)	θ_e (°)	V (μl)	$V^{2/3}$ (mm²)
0	0,786	0,790	91,2	1,062	1,041
120	0,795	0,790	91,9	1,064	1,042
240	0,801	0,789	92,6	1,074	1,049
360	0,808	0,789	93,0	1,084	1,055
480	0,814	0,788	93,9	1,098	1,064
600	0,820	0,789	94,0	1,106	1,069
720	0,825	0,788	94,5	1,118	1,077
840	0,830	0,787	95,2	1,127	1,083

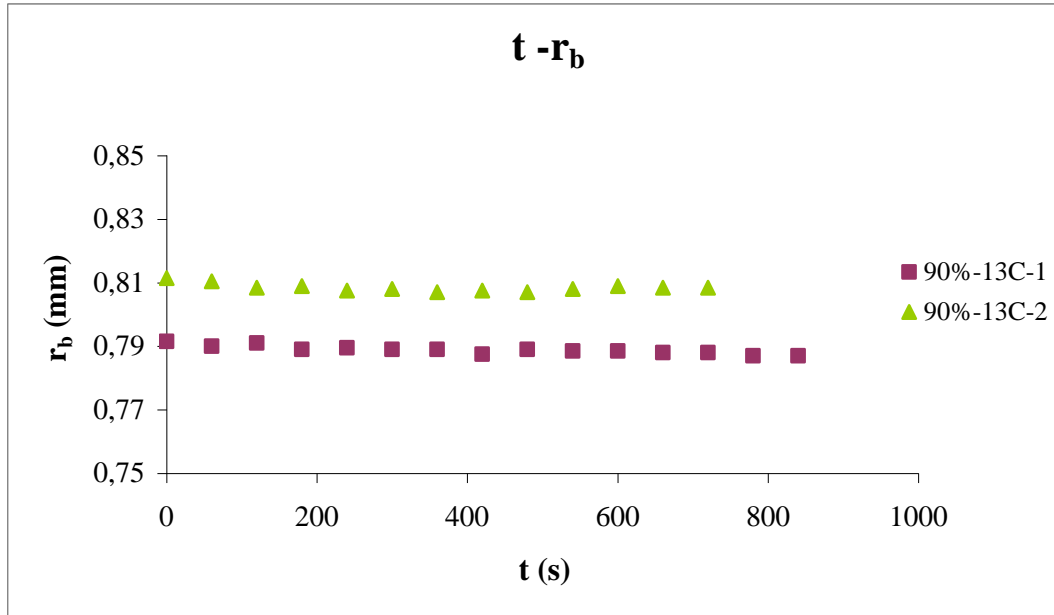
Çizelge 7.14. 90% bağıl nem 13 °C' de 2. denemeye ait h , r_b , θ_e , V , $V^{2/3}$ deneysel veriler.

t (s)	h (mm)	r_b (mm)	θ_e (°)	V (μl)	$V^{2/3}$ (mm²)
0	0,828	0,812	93,3	1,172	1,112
120	0,835	0,809	93,7	1,189	1,122
240	0,838	0,808	94,3	1,196	1,127
360	0,845	0,807	94,5	1,194	1,125
480	0,848	0,807	94,8	1,214	1,138
600	0,852	0,809	94,7	1,225	1,145
720	0,857	0,809	95,0	1,227	1,146

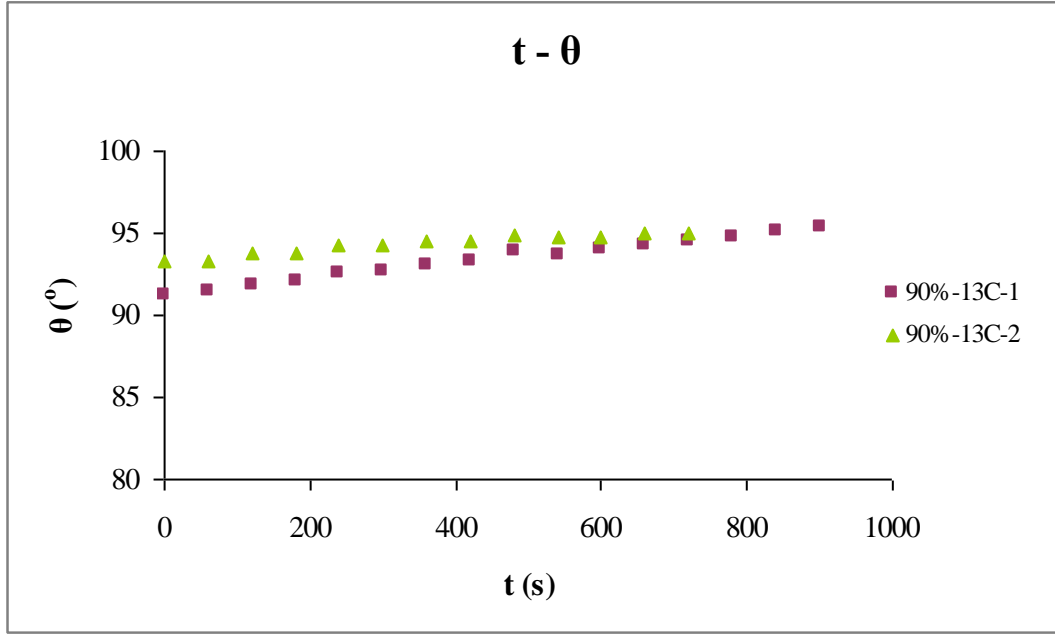
Bütün analiz edilmiş veriler kullanılarak su damlası için çizilen (r_b -t), (θ -t), (V -t) ve ($V^{2/3}$ -t) grafikleri (7.18) - (7.22) numaralı şekillerde gösterilmektedir.



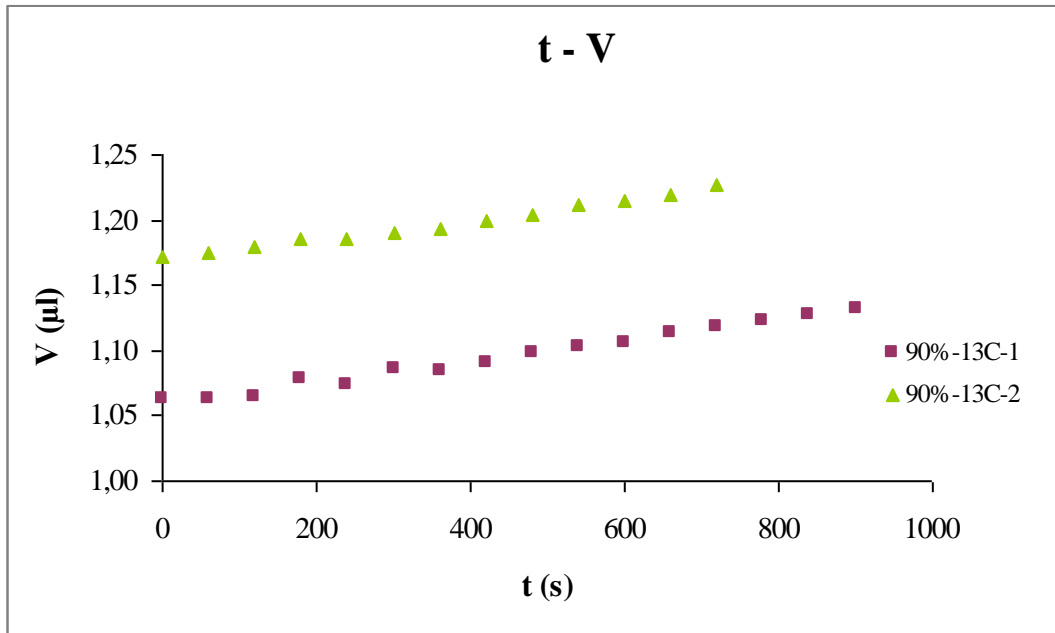
Şekil 7.18. Zamanla damla yüksekliğinin değişimi grafiği.



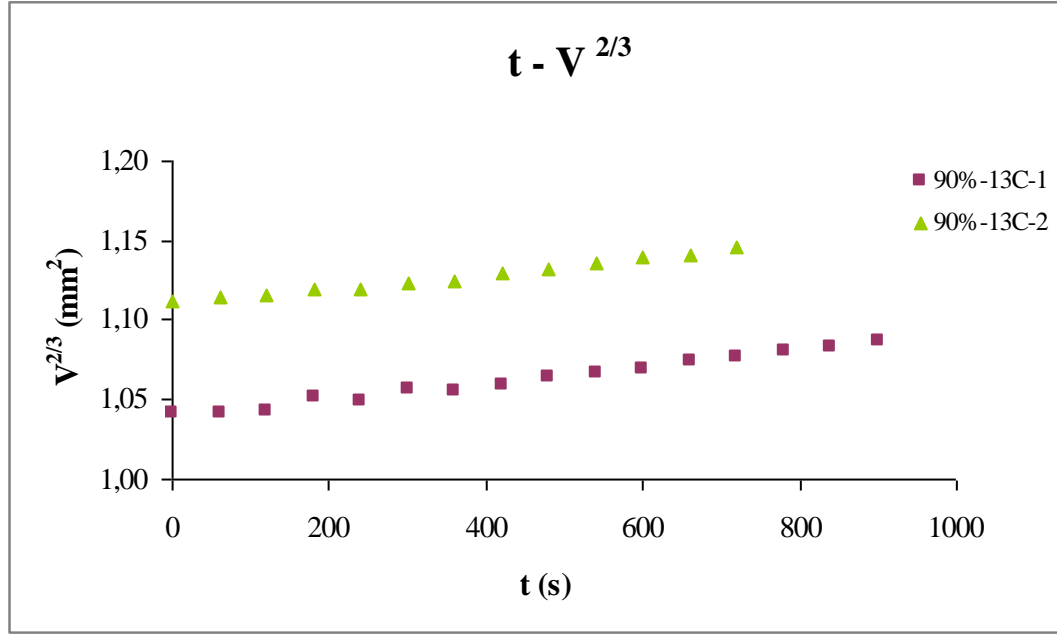
Şekil 7.19. Zamanla temas yarıçapının değişimi grafiği.



Şekil 7.20. Zamanla temas açısının değişimi grafiği.



Şekil 7.21. Zamanla damla hacminin değişimi grafiği.



Şekil 7.22. Zamanla $V^{2/3}$ değişimi grafiği.

Su damlası çevresinde oluşan bir diğer damla ile birleşene kadar belirli bir hacme kadar büyümektedir ve büyüme süresince temas yarıçapı sabit kalmakta temas açısında yüksekliğinde ise artış gözlenmektedir. Denemeler sonucunda damlalarda meydana gelen hacim büyümeleri % olarak hesaplanmış olup elde edilen değerler Çizelge 7.15' de görülmektedir. Deneme koşulları, başlangıçta yüzeyin denge temas açısı (θ_i), damlanın başlangıçtaki temas yarıçapı (r_{bi}), yükseklik (h_i), hacim (V_i) değerleri Çizelge 7.15' de görülmektedir.

Çizelge 7.15. Deneme koşulları, yüzeyin ve damlanın başlangıç koşulları, damlanın hacim büyümesi değerleri.

Sıcaklık (°C)	Bağıl nem	θ_i (°)	r_{bi} (mm)	h_i (mm)	V_i (µl)	V_s (µl)	Hacim büyümesi (%)
13	90%	91,4	0,792	0,790	1,063	1,132	6,49
13	90%	93,3	0,812	0,828	1,172	1,227	4,69

90% bağıl nem koşullarında ortalama 5,6 % hacim büyümesi gerçekleşmiştir.

Su damlası yoğunlaşması ile 90% bağıl nem değerinde 1 µl su damlasının büyümesi sonucunda deneysel olarak elde edilen $V^{2/3}$ -zaman grafiklerinden eğim ve doğrusal regrasyon (R^2) değerleri belirlenerek deneysel olarak (5.23) denklemine göre eğim değerinden damlanın büyüme hızı değerleri belirlenmiştir. Bu değerler Çizelge 7.17’ de verilmiştir.

Teorik eğim değerlerinin hesaplanabilmesi için suyun sifüzyon sabiti değeri gerekmektedir. Bunun için sıvıların difüzyon sabiti $\frac{D_1}{D_2} = \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{1,89}$ denklemi kullanılmıştır ve referans olarak 273 K deki difüzyon sabitinin $0.217 \text{ cm}^2/\text{s}$ olduğu değer kullanılmıştır. Farklı sıcaklıklardaki difüzyon sabiti değerleri Çizelge 7.16 ‘da verilmiştir.

Çizelge 7.16. Farklı sıcaklıklardaki difüzyon sabiti değerleri.

T °C	T(K)	D (cm ² /s)
10	283	0,232267633
11	284	0,233821258
12	285	0,23537976
13	286	0,236943137
14	287	0,238511386
15	288	0,240084506
16	289	0,241662494
17	290	0,24324535
18	291	0,244833071
19	292	0,246425655
20	293	0,248023101

Teorik eğim değeri alttaki katının hesaba katılmadan ($f(\theta)$ ’sız eğim) ve büyümenin meydana geldiği yüzeyin de etkisi, $f(\theta)$, hesaba katılarak ($f(\theta)$ ’lı eğim) (5.21), (5.25), (5.26) denklemleri yardımı ile hesaplanmıştır. Bu hesapların yapılabilmesi için gerekli belirli sıcaklık değerlerindeki P_{vs} değerleri ‘CRC Handbook’ tan kullanılmıştır. Açılı değeri olarak büyüme başlangıcındaki ve

sonundaki açılarının ortalaması alınarak hesaplama yapılmıştır. Elde edilen veriler Çizelge 7.17 de görülmektedir.

Çizelge 7.17. $dV^{2/3}/dt$ eğim, $f(\theta)$ 'lı ve $f(\theta)$ 'süz eğim değerleri ve $dV^{2/3}/dt$ eğim değerlerinin $f(\theta)$ 'lı ve $f(\theta)$ 'süz eğimlerden % olarak sapma değerleri.

Sıcaklık (°C)	Bağıl Nem (%)	θ (°)	$(dV^{2/3}/dt)$ (mm ² /s)	R^2	$f(\theta)$ 'lı eğim (mm ² /s)	$f(\theta)$ 'lı sapma (%)	$f(\theta)$ 'süz eğim (mm ² /s)	$f(\theta)$ 'süz sapma (%)
13	90	93	$5,3 \times 10^{-5}$	0,987	$8,8 \times 10^{-5}$	39,77	$17,1 \times 10^{-5}$	69,01
13	90	94	$4,8 \times 10^{-5}$	0,988	$8,8 \times 10^{-5}$	45,45	$17,0 \times 10^{-5}$	71,76

Ortalama 5,6% hacim büyümesinin sağlandığı durum için damlanın büyüme hızı ortalama $5,5 \times 10^{-5}$ mm²/s olarak belirlenmiştir. Deneysel ve teorik eğim değerlerinin karşılaştırılması ile büyümenin gerçekleştiği katı yüzeyin varlığının etkisi, $f(\theta)$ faktörünün hesaba katılması ile sonuçlar teoriye daha yakın sonuçlar vermektedir. Bu da $f(\theta)$ faktörünün önemini vurgulamaktadır.

8. SONUÇLAR

Mikro desenli süperhidrofobik yüzeyler üzerinde 5 µl su damlasının buharlaşmasının takibi sonucunda, buharlaşma bu yüzeyler üzerinde belirli bir süre temas açısının azalarak temas yarıçapının sabit kaldığı sabit temas yarıçapı modelinde, belirli süre sonunda ise temas yarıçapının azaldığı temas açısının sabit kaldığı sabit temas açısı modelinde yani karışık (mixed) modelinde gerçekleşmektedir.

Desen çapı (d) değerinin farklı olduğu numuneler üzerinde buharlaşma denemeleri sonucunda buharlaşma hızının desen çapının artışı ile azaldığı gözlenmiştir. Buharlaşma sırasında desen çapı daha fazla olan numunelerin yüzeyinde su damlasının hava ile temas ettiği alan daha azdır. Bu durumda substratın buharlaşmaya etkisi artarak buharlaşmaya engel olmaktadır ve buharlaşma hızı azalmaktadır.

Kenardan kenara mesafe (s) değerinin artışı ile ise buharlaşma hızı artan bir eğilim göstermektedir. Buharlaşma sadece katı yüzeyin üst kısmından değil aynı zamanda desenler arası boşluklardan da gerçekleşerek buharlaşmayı hızlandırmaktadır.

Kenardan kenara mesafe (s) / desen çapı (d) değerinin artışı ile buharlaşma hızı artmaktadır. Bu oranın daha büyük olmasını sağlayan kenardan kenara mesafe değerinin büyüklüğü ya da desen çapı değerinin küçüklüğüdür. Desen çapı değerinin daha az olması buharlaşmayı hızlandıracağı gibi kenardan kenara mesafenin artışı da hava ile teması arttırdığından buharlaşmayı hızlandırma eğilimindedir Bu yüzden bu oranın artışının buharlaşmayı hızlandırması beklenen bir sonuçtur.

Yüzey özelliklerinin yoğunlaşan sıvının yüzey kaplama oranına etkisi, yüzey özelliği birbirinden farklı 5 adet polimer yüzeylerde yoğunlaşmanın gerçekleştirilmesi ile incelenmiştir. Denge temas açısının ve temas açısı histeresinin artışının yüzey kaplama oranına azaltıcı etkisi, serbest yüzey enerjisinin artışının ise yüzey kaplama oranına arttırıcı bir etkisi olduğu görülmektedir. Yüksek denge temas açısına sahip yüzeylerin aynı zamanda düşük serbest yüzey enerjisine sahip olması nedeni ile temas açısının yüzey kaplama oranına azaltıcı etkisinin tersine serbest yüzey enerjisine arttırıcı etki göstermesi beklenen bir sonuçtur. Bu durum tek bir damlanın yoğunlaşma koşullarında büyümesinin takibinde yüksek temas açısına sahip yüzeylerin seçilmesi için temel olmuştur.

90% bağıl nem koşullarında TEFLON FEP 100 yüzeyinde damla yoğunlaşması süresince 1 μ l su damlasının etrafında oluşan diğer damlalar ile birleşene kadar büyümesi takip edilmiştir. Su damlası hacimce ortalama 5.6 % büyümektedir ve büyümesi esnasında temas yarıçapı sabit kalmakta yüksekliği ve temas açısı artmaktadır. Büyüme hızı, büyümenin gerçekleştiği katının etkisinin, $f(\theta)$ faktörünün, hesaba katıldığı durumda teoriye daha uyumlu sonuçlar vermiştir ve bu da $f(\theta)$ faktörünün büyüme sırasında önemini vurgulamaktadır. Teoriye daha uyumlu sonuçlar elde edebilmek için bağıl nemin 90 %' dan daha yüksek olduğu koşulların sağlanması önerilebilir.

KAYNAKLAR

1. Beysens D., (2006), *C. R. Physique*, 7, 1082-1100.
2. Parker A. R., Lawrence C. R., (2001), *Nature*, 414, 33–34.
3. Leach R. N., Stevens F., Langford S. C., Dickinson J. T., (2006), 22(21), 8864-8872.
4. Sokuler M., Auernhammer G. K., Liu C. J., Bonaccorso E., Butt H. J., (2010), 89, 36004 p1-p6.
5. Boreyko J. B., Chen C. H., (2009), *Physical Review Letters*, 103, 184501.
6. McHale G., Rowan S. M., Newton M. I., Banerjee M. K., (1998), *J. Phys. Chem. B*, 102, 1964- 1967.
7. Tosun A., Erbil H.Y., (2009), *Applied Surface Science*, 256, 1278-1283.
8. Furuta T., Nakajima A., Sakai M., Isobe T., Kameshima Y., Okada K., (2009), *Langmuir*, 25(10), 5417-5420.
9. McHale G., Aqil S., Shirtcliffe N. J., Newton M. I., Erbil H. Y., (2005), 21, 11053-11060
10. Erbil H. Y., (2006), *Surface Chemistry of Solid and Liquid Interfaces*, Blackwell Publishing, Ch 9, 308.
11. Erbil H. Y., Demirel A. L., Avci Y., Mert O., (2003), *Science*, 299, 1377-1380.
12. Yang Y. L., Hsu C. C., Chang T. L., Kuo L. S., Chen P. H., (2010), *Applied Surface Science*, 256, 3683 – 3687.
13. Shibuichi S., Onda T., Satoh N., Tsujii K., (1996), *J. Phys. Chem. B*, 100, 19512-7.
14. Bico J., Marzolin C., Quere, D, (1999), *Europhys Lett.*, 47, 220-6.
15. Richard D., Quere D., (1999), *Europhys Lett.*, 48, 286-91.
16. Chen W. Fadeev M. C., Hsieh M. C., Oner D., Youngblood J., McCarty T. J, (1999), *Langmuir*, 15, 3395-9.
17. Tadnaga K., Katata N., Minami, T., (1997), *J. Am. Ceram. Soc.*, 80, 1040
18. Nakajima K. Hashimoto and T. Watanabe, (2001), *Monatshefte Für Chemie* 132 (1), 31-41.
19. Li X.M., Reinhoudt D., Crego-Calama M., *Chem. Soc. Rev.*, (2007) 36, 1350–68.

20. Feng L., Li S., Li Y., Li H., Zhang L., Zhai J., Song Y., Liu B., Jiang L., Zhu D., (2002), *Advanced Materials*, 14, 1857-60.
21. Kang C. K., Lee, S. M., Jung, I. D., Jung, P. G., Hwang, S., J., Ko, J. S., (2008), *J.Micromech.Microeng.*, 18, 075007 (7pp).
22. Çengel Y.A., Boles M.A. (1998), *Thermodynamics: An Engineering Approach*, McGraw- Hill, Third Edition, Ch2, Ch12.
23. Atkins P. W., (1998), *Physical Chemistry*, Oxford University Press, 142.
24. Erdik E., Sarıkaya, Y., (2002), *Temel Üniversite Kimyası*, Gazi Kitabevi, 243-263.
25. Bindon H. H., (1965), *A critical review of tables and charts used in Psychrometry*, Reinhold Publishing, 3-15.
26. Drıgo A., Alocco G., (1955), *Pratik Fizik*, İTÜ, 633-639.
27. Eroğlu A., (2003), *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
28. Winston P. W., Bates D. H., (1960), *Ecology*, 41, 232- 237.
29. Özler T.E., (2007), *Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
30. Vemuri S., Kim K. J., (2006), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49, 649-657.
31. Ma X., Rose J. W., Xu D., Lin J., Wang B., (2000), *Chemical Engineering Journal*, 78, 87-93.
32. Kumar A., Whitesides G. M., (1994), *Science*, 263, 60-62.
33. Zhao H., Beysens D., (1995), *Langmuir*, 11, 627-634.
34. Briscoe B. J., Williams D.R., Galvin K. P., (2005), *Colloids and Surfaces A:Physicochem. Eng. Aspects*, 264, 101-105.
35. Zhong L., Xuehu M., Sifang W, Mingzh W., Xiaonan L., (2010), *Chem Eng J.*, 156, 546-552
36. Narhe R. D., Beysens D. A., (2007), *Langmuir*, 23, 6486-6489.
37. Narhe R. D., Beysens D. A., (2006), *Europhys. Lett.*, 75(1), 98-104.
38. Chen C. H., Cai Q., Tsai C., Chen C. L., Xiong G., Yu Y., Ren Z., (2007), *Applied Physics Letters*, 90, 173108.
39. Dorrer C., Rhe J., (2007), *Langmuir*, 23(7), 3820-3824.
40. Mockenhaupt B., Ensikat H. J., Spaeth M., Barthlott W., (2008), *Langmuir*, 24, 13591-13597.

41. Wier K. A., McCarty T. J., (2006), *Langmuir*, 22 (6), 2433-2436.
42. Steyer A., Guenoun P., Beysens D., Knobler C. M., (1991), *Physical Review A*, 44 (12), 8271- 8277.
43. Narhe R. D., Beysens D., Nikolayev V. S. (2003), *Langmuir*, 20, 1213-1221.
44. Picknett R. G.; Bexon R., (1977), *J. Colloid Interface Sci.*, 61,336.
45. Li G., Flores S. M., Vavilala C., Schmittl M., Graf K., (2009), *Langmuir*, (25)23, 13438-13447.
46. Birdi K. S., Vu D. T., Winter A., (1989), *J. Phys. Chem.* 93, 3102- 3703.
47. Rowan S. M., Newton M. I., McHale G., (1995), *J. Phys. Chem.*, 99, 13268-13271.
48. Kulinich S. A., Farzaneh M., (2009), 255, 4056-4060.
49. Golovko D. S., Butt H. J., Bonaccorso E., (2009), 25, 75-78.
50. Erbil H. Y., Meric A. Y., (1997), *J. Phys. Chem. B*, 101, 6867-6873.
51. Bourgès-Monnier C., Shanahan M. E. R., (1995), *Langmuir*, 11, 2820- 2829.
52. Erbil H. Y., G. McHale, M. I. Newton,(2002), *Langmuir*, 18, 2636-2641.
53. Panwar A. K., Barthwal S. K., Ray S., (2003), *J. Adhesion Sci. Technol.*, 17, 1321-1329.
54. Feng X., Li B., Petersen E., Ji Y., Sokolov J. C., Rafailovich M. H., (2005), *J. Phys. Chem. B*, 109, 20554- 20557.
55. Kim J.-H., Ahn S. II, Kim J. H., Zin W.-C., (2007), *Langmuir*, 23, 6163-6169.
56. Dandan M., (2008), Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

ÖZGEÇMİŞ

Nilay TÜCCAR, 1984 yılında Adapazarı' nda doğdu. İlköğrenimini Ahmet AKKOÇ İlkokulu' nda gördükten sonra orta ve lise öğrenimini Sakarya Anadolu Lisesi' nde 2002 yılında tamamladı. Aynı yıl Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı ve 2007 yılında lisans eğitimini tamamladı. 2005 yılında IAESTE aracılığı ile INA Oil Industry A.Ş. Zagreb-Hırvatistan' da 2 ay süre ile Ar-Ge laboratuvarında çalıştı. 2008 yılında Neutec İlaç A.Ş.' de 8 ay süre ile Ar-Ge uzmanı olarak çalıştı ve aynı yıl Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Kimya Mühendisliği Bölümü' nde yüksek lisans eğitimine başladı. 2009 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Kimya Mühendisliği Bölümü' nde proje asistanı olarak göreve başladı ve halen bu görevini sürdürmektedir.