



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Πειραματικές μετρήσεις της δυναμικής επιφανειακής τάσης  
διεπιφανειών σε υδατικά διαλύματα επιφανειοδραστικού SDS  
υπό  
ΧΡΗΣΤΟΥ ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΥ**

**Διπλωματική Εργασία**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για  
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2022



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**Πειραματικές μετρήσεις της δυναμικής επιφανειακής τάσης  
διεπιφανειών σε υδατικά διαλύματα επιφανειοδραστικού SDS  
υπό  
ΧΡΗΣΤΟΥ ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΥ**

**Διπλωματική Εργασία**

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των απαιτήσεων για  
την απόκτηση του Διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2022

© 2022 Γιαννόπουλος Χρήστος

Η έγκριση της διπλωματικής εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν υποδηλώνει αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα (Ν. 5343/32 αρ. 202 παρ. 2).

**Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:**

Πρώτος Εξεταστής      Βασίλης Μποντόζογλου, Καθηγητής ΤΜΜ/ΠΘ  
(Επιβλέπων)

Δεύτερος Εξεταστής      Νικόλαος Πελεκάσης, Καθηγητής ΤΜΜ/ΠΘ

Τρίτος Εξεταστής      Γεώργιος Χαραλάμπους, Καθηγητής ΤΜΜ/ΠΘ

## Ευχαριστίες

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα της εργασίας, Καθηγητή κ. Βασίλη Μποντόζογλου, για την πολύτιμη βοήθεια, καθοδήγηση και υποστήριξη του κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ τους Καθηγητές κκ. Νικόλαο Πελεκάση και Γεώργιο Χαραλάμπους, που αποτελούν τα δύο μέλη της εξεταστικής επιτροπής, για το χρόνο και τις υποδείξεις τους. Είμαι ευγνώμων για την υποστήριξη της αδερφής μου Κατερίνας Γιαννοπούλου και των φίλων μου Σπήλιου Δελλή και Μαρίας Τζιράκη. Πάνω απ' όλα, θέλω να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την αγάπη τους και την υποστήριξη τους όλα αυτά τα χρόνια. Η εργασία αυτή είναι αφιερωμένη στον πατέρα μου Παντελή και τη μητέρα μου Αλεξάνδρα Γιαννοπούλου.

# Πειραματικές μετρήσεις της δυναμικής επιφανειακής τάσης διεπιφανειών σε υδατικά διαλύματα επιφανειοδραστικού SDS

ΧΡΗΣΤΟΣ ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΣ

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Επιβλέπων Καθηγητής: Βασίλης Μποντόζογλου, Καθηγητής TMM/ΠΘ

## Περίληψη

Οι επιφανειοδραστικές ουσίες, ή για συντομία επιφανειοδραστικά, επηρεάζουν την επιφανειακή τάση διεπιφανειών σε υδατικά διαλύματα και χρησιμοποιούνται σε πολλές εφαρμογές. Τα μόρια των επιφανειοδραστικών προσροφώνται στη διεπιφάνεια υγρού-αέρα με πεπερασμένη ταχύτητα και μεταβάλουν έτσι την επιφανειακή τάση της διεπιφάνειας με τη πάροδο του χρόνου. Λόγω αυτής της χρονικής μεταβολής, η επιφανειακή τάση χαρακτηρίζεται ως δυναμική. Ένας τρόπος για το χαρακτηρισμό του χρόνου, είναι η ταχύτητα δημιουργίας φυσαλίδων μέσα σε ένα υδατικό διάλυμα με επιφανειοδραστικό. Μετά από ένα χρονικό διάστημα, η τιμή της επιφανειακής τάσης συγκλίνει σε μία συγκεκριμένη, την οποία ονομάζουμε επιφανειακή τάση ισορροπίας.

Στη παρούσα εργασία, γίνεται η μελέτη της δυναμικής καθώς και της επιφανειακής τάσης ισορροπίας σε υδατικά διαλύματα επιφανειοδραστικού SDS (sodium dodecyl sulfates) και NaCl μέσω πειραματικών μετρήσεων με τη χρήση τενσιομετρίας μέγιστης πίεσης φυσαλίδας. Η μέθοδος μέγιστης πίεσης φυσαλίδας, βασίζεται στη μέτρηση της πίεσης μίας φυσαλίδας που δημιουργείται στο εσωτερικό ενός υγρού διαλύματος μέσω ενός τριχοειδούς σωλήνα που εξάγει αέρα, τη χρονική στιγμή που η φυσαλίδα έχει διάμετρο ίση με τη διάμετρο του τριχοειδούς σωλήνα (μέγιστη πίεση στη φυσαλίδα). Οι μετρήσεις έγιναν με τη χρήση τενσιόμετρου του εργαστηρίου και λογισμικού που καταγράφει και αποθηκεύει τα δεδομένα.

Τα δεδομένα των μετρήσεων παριστάνονται σε διαγράμματα, όπου απεικονίζεται η επίδραση της συγκέντρωσης του SDS στην μεταβολή της επιφανειακής τάσης ισορροπίας, και η επίδραση του χρόνου έκθεσης της φυσαλίδας μέσα στο υδατικό διάλυμα, καθώς και της συγκέντρωσης του SDS, στη δυναμική επιφανειακή τάση. Παρατηρήθηκε ότι για πολύ

μικρούς χρόνους έκθεσης της φυσαλίδας, η τιμή της επιφανειακής τάσης παραμένει σταθερή στη τιμή που θα είχε χωρίς την ύπαρξη του επιφανειοδραστικού. Για μεγαλύτερους χρόνους, ο αρχικός ρυθμός μεταβολής της επιφανειακής τάσης σχετίζεται πολύ ικανοποιητικά με τη συγκέντρωση SDS στο διάλυμα.

**Λέξεις-κλειδιά:** δυναμική επιφανειακή τάση, επιφανειακή τάση ισορροπίας, διεπιφάνεια, επιφανειοδραστικά, μικκύλια, κρίσιμη συγκέντρωση μικκυλίων (CMC), προσρόφηση, μέθοδος μέγιστης πίεσης φυσαλίδας (Maximum Bubble Pressure Method-MBPM), тенσιόμετρο, χρόνος γήρανσης φυσαλίδας, SDS

# **Experimental Measurements of Dynamic Interfacial Tension in SDS Surfactant Solutions**

CHRISTOS GIANNOPOULOS

Department of Mechanical Engineering, University of Thessaly

Supervisor: Vasilis Bontozoglou, Professor in DoME/UTH

## **Abstract**

Surfactants affect the surface tension of interfaces in aqueous solutions and are used in many applications. Surfactant molecules adsorb to the liquid-air interface at a finite rate and thus change the surface tension of the interface over time. Because of this temporal variation, surface tension is characterized as dynamic. One way to define time is the rate at which bubbles form in an aqueous surfactant solution.. After a period of time, the value of the surface tension converges to a specific one, which we call the equilibrium surface tension.

In the present work, the dynamics as well as the equilibrium surface tension in aqueous solutions of surfactant SDS (sodium dodecyl sulfate) and NaCl are studied through experimental measurements using maximum bubble pressure tensiometry. The maximum bubble pressure method is based on measuring the pressure of a bubble created inside a liquid solution through a capillary tube that extracts air, at the time when the bubble has a diameter equal to the diameter of the capillary tube (maximum pressure in the bubble). Measurements were made using a laboratory tensiometer and software that records and stores the data.

The measurement data are represented in diagrams, where the effect of the concentration of SDS on the change of the equilibrium surface tension, and the effect of the exposure time of the bubble in the aqueous solution, as well as the concentration of SDS, on the dynamic surface tension are illustrated. It was observed that for very short exposure times of the bubble, the value of the surface tension remains constant at the value it would have had without the presence of the surfactant. For longer times, the initial rate of change of surface tension correlates very well with the SDS concentration in the solution.



**Key words:** dynamic surface tension, equilibrium surface tension, interface, surfactants, micelles, critical micelle concentration (CMC), adsorption, Maximum Bubble Pressure Method (MBPM), tensiometer, surface age, SDS

## Πίνακας Περιεχομένων

<b>1</b>	<b>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b> .....	<b>1</b>
1.1	Κίνητρο, Υπόβαθρο και Βιβλιογραφική Ανασκόπηση .....	1
1.2	Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας .....	2
<b>2</b>	<b>ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ</b> .....	<b>3</b>
2.1	Βασικές έννοιες .....	3
2.1.1	Διαμοριακές δυνάμεις.....	3
2.1.2	Επιφανειακή τάση .....	3
2.1.3	Τριχοειδή φαινόμενα .....	7
2.2	Επιφανειοδραστικές ουσίες .....	9
2.2.1	Κρίσιμη συγκέντρωση μικκυλίων (CMC) .....	11
2.2.2	Μικκύλια.....	13
2.2.3	Sodium dodecyl sulfate (SDS) .....	17
2.3	Προσρόφηση στη διεπιφάνεια υγρού αερίου και μοντέλα ισορροπίας επιφανειακών τάσεων .....	18
2.3.1	Εξίσωση Gibbs .....	19
2.3.2	Εξίσωση Langmuir .....	20
2.3.3	Εξίσωση Frumkin .....	21
2.3.4	Εξίσωση Davies .....	22
2.3.5	Εξίσωση Frumkin-Davies .....	24
2.4	Μέθοδοι μέτρησης επιφανειακής τάσης .....	25
<b>3</b>	<b>Πειραματική διαδικασία</b> .....	<b>26</b>
3.1	Μέθοδος μέγιστης πίεσης φυσαλίδας (MBPM) .....	26
3.2	Πείραμα.....	29
3.2.1	Πειραματικός εξοπλισμός .....	29
3.2.2	Πειραματική διάταξη.....	30
3.2.3	Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας .....	34
<b>4</b>	<b>ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ</b> .....	<b>36</b>
4.1	Γενικά αποτελέσματα .....	36
4.2	Διαγράμματα Επιφανειακής τάσης – Χρόνου γήρανσης φυσαλίδας.....	39
<b>5</b>	<b>ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ</b> .....	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	<b>48</b>
<b>7</b>	<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ</b> .....	<b>49</b>

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά тенσιόμετρου BP50.....	29
Πίνακας 3-2: Ομάδες πειραματικών μετρήσεων.....	34
Πίνακας 4-1: Τιμές επιφανειακής τάσης στις αντίστοιχες συγκεντρώσεις SDS.....	37

## Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1: Επιφανειακής τάσης – χρόνου γήρανσης φυσαλίδας για διάφορες συγκεντρώσεις SDS στο διάλυμα μας.....	36
Διάγραμμα 2: Επιφανειακής τάσης – συγκέντρωσης SDS στο διάλυμα.....	38
Διάγραμμα 3: Προσδιορισμός της CMC από το διάγραμμα επιφανειακής τάσης – συγκέντρωσης SDS.....	38
Διάγραμμα 4: Επιφανειακής τάσης - χρόνου γήρανσης, για διάλυμα απιονισμένου νερού, 10mM NaCl και 0,005g SDS/100ml.....	40
Διάγραμμα 5: Επιφανειακής τάσης - χρόνου γήρανσης, για διάλυμα απιονισμένου νερού, 10mM NaCl και 0,01g SDS/100ml.....	41
Διάγραμμα 6: Επιφανειακής τάσης - χρόνου γήρανσης, για διάλυμα απιονισμένου νερού, 10mM NaCl και 0,02g SDS/100ml.....	42
Διάγραμμα 7: Επιφανειακής τάσης - χρόνου γήρανσης, για διάλυμα απιονισμένου νερού, 10mM NaCl και 0,04g SDS/100ml.....	43
Διάγραμμα 8: Επιφανειακής τάσης - χρόνου γήρανσης, για διάλυμα απιονισμένου νερού, 10mM NaCl και 0,085g SDS/100ml.....	44
Διάγραμμα 9: Επιφανειακής τάσης - χρόνου γήρανσης, για διάλυμα απιονισμένου νερού, 10mM NaCl και 0,155g SDS/100ml.....	45
Διάγραμμα 10: Απεικόνιση της μεταβολής της αρχικής κλίσης της καμπύλης μείωσης της δυναμικής επιφανειακής τάσης με τη μεταβολή της συγκέντρωσης του επιφανειοδραστικού SDS στο υδατικό διάλυμα και σύγκριση με τη λογαριθμική συνάρτηση $\gamma=12,41\ln(x)+70,387$ (με διακεκομμένη γραμμή). .....	46

## Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2-1: Σχηματική απεικόνιση διαμοριακών δυνάμεων στην επιφάνεια και το εσωτερικό ενός υγρού [20].	4
Σχήμα 2-2: Δυνάμεις σε εσωτερικά και επιφανειακά άτομα [21].	4
Σχήμα 2-3: Το οριζόντιο σύρμα που ολισθαίνει, βρίσκεται σε ισορροπία υπό την επενέργεια της δύναμης επιφανειακής τάσης με κατεύθυνση προς τα πάνω και της έλξης $w+T$ με κατεύθυνση προς τα κάτω [22].	5
Σχήμα 2-4: (α) Τομή μιας σαπουνόφουσκας που δείχνει τις δυο επιφάνειες και το λεπτό στρώμα υγρού μεταξύ τους. (β) Ισορροπία της μισής σαπουνόφουσκας [22].	6
Σχήμα 2-5: Όταν η διαχωριστική επιφάνεια υγρού-αερίου συναντά την επιφάνεια ενός στερεού, συνήθως καμπυλώνεται προς τα πάνω ή προς τα κάτω κοντά στην επιφάνεια του στερεού [22].	8
Σχήμα 2-6: Δυνάμεις επιφανειακής τάσης σε ένα υγρό μέσα σε τριχοειδή σωλήνα. Το υγρό (α) ανέρχεται αν $\theta < 90^\circ$ ή (β) κατέρχεται, αν $\theta > 90^\circ$ . Η διάμετρος του σωλήνα έχει μεγεθυνθεί για μεγαλύτερη ακρίβεια [22].	8
Σχήμα 2-7: Δομή επιφανειοδραστικού μορίου [7].	10
Σχήμα 2-8: Επιφανειακή τάση διαλύματος επιφανειοδραστικού με αυξανόμενη συγκέντρωση, σχηματισμός μικκυλίων [17].	11
Σχήμα 2-9: Προσδιορισμός της CMC με τενσιόμετρο [17].	12
Σχήμα 2-10: Μορφή μικκυλίου [5].	13
Σχήμα 2-11: Σχηματική απεικόνιση τομής ενός (α) ελασματοειδούς μικκυλίου McBain και (β) σφαιρικού μικκυλίου Hartley [11].	14
Σχήμα 2-12: Ένα μικκύλιο ιόντων δωδεκυλοτριμεθυλαμμωνίου με αριθμό συσσωμάτωσης 14 [11].	14
Σχήμα 2-13: Ένα μικκύλιο ιόντων δωδεκυλοτριμεθυλαμμωνίου με αριθμό συσσωμάτωσης 58 [11].	15
Σχήμα 2-14: Απεικονίσεις (α) σφαιρικού μικκυλίου, (β) κυλινδρικού, (c) δισκοειδούς και (d) κυστιδίου [3].	16
Σχήμα 2-15: Μερικά παραδείγματα μεταβολής φυσικών ιδιοτήτων με την αύξηση της συγκέντρωσης του επιφανειοδραστικού [10].	16
Σχήμα 2-16: Τέσσερις θεμελιώδεις διεργασίες για θερμοδυναμικές ισορροπίες αμφίφιλων μορίων σε διαλύματα: (1) διάλυση αμφίφιλων σε διάλυμα, (2) συσώρευση διαλυμένων	

αμφίφιλων, (3) προσρόφηση διαλυμένων αμφίφιλων στη διεπιφάνεια, (4) εξάπλωση αμφίφιλων από τη δική τους κύρια φάση όγκου, απευθείας στη διεπαφή [12] .....	17
Σχήμα 2-17: Απεικόνιση ενός μορίου SDS [4].....	18
Σχήμα 3-1: Διαγράμματα μετρούμενης πίεσης φυσαλίδας κατά το σχηματισμό της [9],[8] .	27
Σχήμα 3-2: Τεσνιόμετρο BP50.....	29
Σχήμα 3-3: Απεικόνιση πειραματικής διάταξης [9] .....	30
Σχήμα 3-4: Επιλογή νέας μέτρησης με τη μέθοδο Bubble Pressure. ....	31
Σχήμα 3-6: Επιλογή του υγρού μέσου προς μέτρηση .....	32
Σχήμα 3-6: Επιλογή των παραμέτρων μέτρησης.....	32
Σχήμα 3-7: Επιλογή διαγραμμάτων προς εμφάνιση .....	33
Σχήμα 3-8: Εξαγωγή δεδομένων .....	35

# 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζουμε πληροφορίες εισαγωγικού χαρακτήρα που δίνουν το κίνητρο και το υπόβαθρο της διπλωματικής εργασίας. Επίσης, γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση της σχετικής με την εργασία βιβλιογραφίας. Τέλος, περιγράφονται συνοπτικά οι βασικές ενότητες της διπλωματικής εργασίας.

## 1.1 Κίνητρο, Υπόβαθρο και Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Στόχος της διπλωματικής εργασίας είναι να γίνουν (οι πρώτες στο εργαστήριο) μετρήσεις της δυναμικής επιφανειακής τάσης υδατικού διαλύματος του επιφανειοδραστικού SDS (sodium dodecyl sulfate). Με τον όρο «δυναμική επιφανειακή τάση» εννοούμε τις στιγμιαίες τιμές επιφανειακής τάσης, και τη χρονική μεταβολή τους, καθώς μία νέα διεπιφάνεια υγρού-αέρα σχηματίζεται και σταδιακά ωριμάζει. Η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε είναι η τενσιομετρία μέγιστης πίεσης φυσαλίδας.

Το άρθρο των Alissa J. Prosser, Elias I. Franses, με τίτλο Adsorption and surface tension of ionic surfactants at the air–water interface: review and evaluation of equilibrium models, που δημοσιεύθηκε στο Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, αποτέλεσε κυρίαρχη βάση για το θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας εργασίας καθώς και για σύγκριση των αποτελεσμάτων που εξήχθησαν. Επίσης, το άρθρο Maximum Bubble Pressure Method: Universal Surface Age and Transport Mechanisms in Surfactant Solutions, των Nikolay C. Christov, Krassimir D. Danov, Peter A. Kralchevsky, Kavssery P. Ananthapadmanabhan, and Alex Lips, αποτέλεσε το βασικό κίνητρο για τη πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Πολλά ακόμα επιστημονικά άρθρα και άλλες πηγές, βοήθησαν στην κατανόηση και τη συναγωγή του κειμένου, των σχημάτων και των εξισώσεων που θα ακολουθήσουν. Όλες αυτές οι πηγές παρουσιάζονται στη βιβλιογραφία, στη σελίδα 48.

## 1.2 Οργάνωση Διπλωματικής Εργασίας

Η διπλωματική εργασία χωρίζεται σε τέσσερις ενότητες που καταλαμβάνουν τα Κεφάλαια 2 - 5, αντίστοιχα. Συγκεκριμένα:

Στο Κεφάλαιο 2 γίνεται μια σύντομη αναφορά σε γενικές έννοιες φυσικοχημείας, οι οποίες χρησιμοποιούνται στη παρούσα εργασία.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται επεξήγηση της μεθόδου που χρησιμοποιήθηκε για τις πειραματικές μετρήσεις και του τρόπου που πραγματοποιήθηκαν αυτές.

Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων κυρίως σε μορφή διαγραμμάτων.

Στο Κεφάλαιο 5 πραγματοποιείται η εξαγωγή των τελικών συμπερασμάτων και συνάγονται κάποιες προτάσεις για μελλοντικές περαιτέρω έρευνες.

Τέλος, στο παράρτημα εμφανίζονται τα δεδομένα των μετρήσεων σε μορφή πινάκων.

## 2 ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ

Για την κατανόηση των πειραματικών μετρήσεων αυτής της εργασίας, είναι πρόβλημα πρωτίστως να αναφερθούν, έστω και συνοπτικά, κάποιες βασικές έννοιες φυσικής με τις εξισώσεις που τις εκφράζουν, να γίνει μία εισαγωγή στις επιφανειοδραστικές ουσίες καθώς και σε μεθόδους που χρησιμοποιούνται για να γίνουν πειραματικές μετρήσεις αυτών των μεγεθών.

### 2.1 Βασικές έννοιες

#### 2.1.1 Διαμοριακές δυνάμεις

Εκτός από τους δεσμούς μεταξύ των ατόμων στα μόρια (ενδομοριακοί δεσμοί) ή των ιόντων στις ιοντικές ενώσεις (ιοντικοί δεσμοί), δεσμοί αναπτύσσονται και μεταξύ των μορίων και ονομάζονται διαμοριακοί δεσμοί. Οι δεσμοί αυτοί είναι ηλεκτροστατικής φύσης, γενικά πολύ ασθενέστεροι των ενδομοριακών και παίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση πολλών ιδιοτήτων των αερίων, των στερεών και των υγρών, όπως είναι το σημείο βρασμού, η επιφανειακή τάση, το ιξώδες και άλλα. Μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε δυνάμεις ιόντος-διπόλου μορίου, διπόλου μορίου-διπόλου μορίου, δυνάμεις διασποράς ή London (δυνάμεις στιγμιαίου διπόλου μορίου-στιγμιαίου διπόλου μορίου) και δεσμούς υδρογόνου, που θεωρούνται ως μια ειδική περίπτωση δυνάμεων διπόλου-διπόλου.

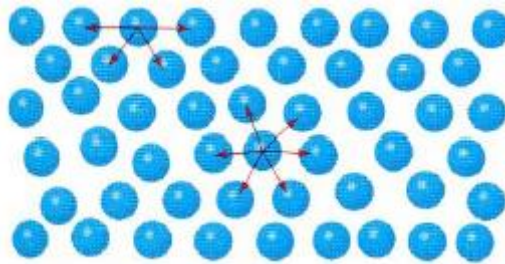
Ως μόνιμο δίπολο ή πολικό μόριο, χαρακτηρίζεται ένα μόριο το οποίο έχει δυο πόλους φορτίων, τον ένα με περίσσεια αρνητικού φορτίου ( $z^-$ ) και τον άλλο με έλλειψη αρνητικού φορτίου ( $z^+$ ).

#### 2.1.2 Επιφανειακή τάση

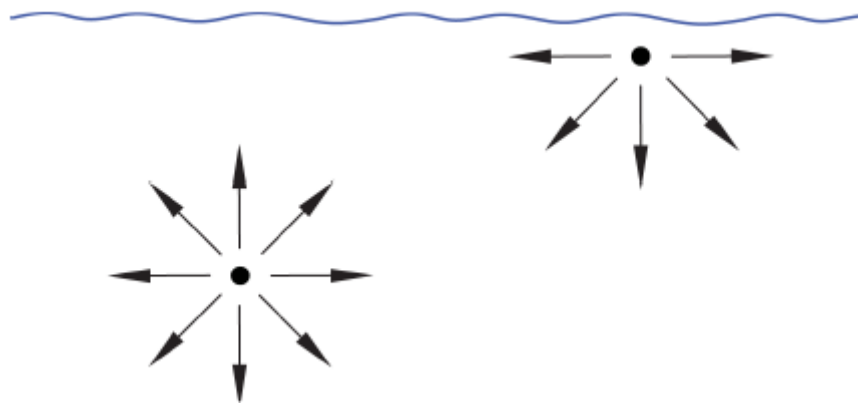
Τα μόρια στο εσωτερικό ενός ρευστού δέχονται ελκτικές δυνάμεις (δυνάμεις συνοχής) από άλλα γειτονικά μόρια από όλες τις διευθύνσεις. Η συνισταμένη λοιπόν όλων των δυνάμεων αυτών είναι μηδέν (για την ακρίβεια η μέση τιμή της είναι μηδέν για πεπερασμένο χρονικό διάστημα). Τα μόρια, όμως, στην επιφάνεια του ρευστού (διεπιφάνεια υγρού-αερίου) δέχονται κυριότερες προς τον κύριο όγκο του ρευστού και μεταξύ τους, με αποτέλεσμα η συνισταμένη των δυνάμεων αυτών να έχει κατεύθυνση προς το εσωτερικό



της μάζας του ρευστού. Αυτό συμβαίνει διότι οι δυνάμεις συνοχής μεταξύ των μορίων του ρευστού είναι πιο ισχυρές από τις αντίστοιχες μεταξύ των μορίων του ρευστού και των μορίων του αερίου στην επιφάνεια. Αυτή η ασυμμετρία δημιουργεί μια κατάσταση τάσης στην επιφάνεια του ρευστού η οποία δρα στο επίπεδο της επιφάνειας και ορίζεται ως επιφανειακή τάση.



Σχήμα 2-1: Σχηματική απεικόνιση διαμοριακών δυνάμεων στην επιφάνεια και το εσωτερικό ενός υγρού [20].



Σχήμα 2-2: Δυνάμεις σε εσωτερικά και επιφανειακά άτομα [21].

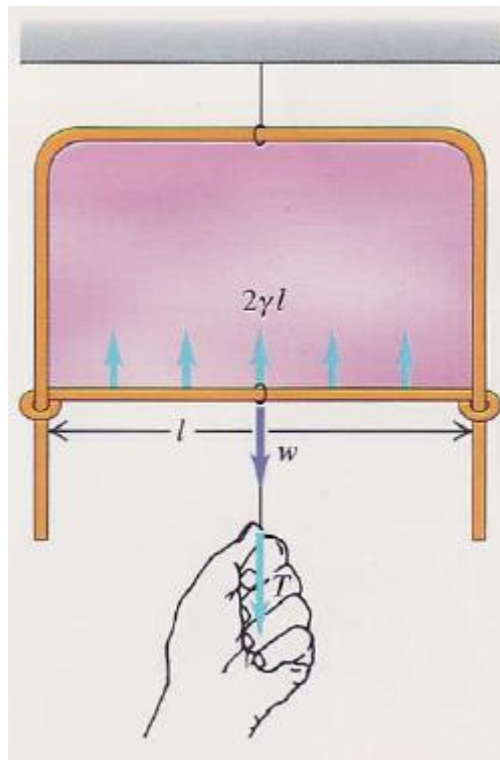
Η επιφανειακή τάση τείνει να ελαχιστοποιήσει την επιφάνεια του ρευστού και είναι δύναμη ανά μονάδα μήκους με μονάδες στο S.I τα Newton ανά μέτρο (N/m), αλλά συνήθως χρησιμοποιούμε τη μονάδα στο cgs, μια δύνη ανά εκατοστόμετρο (dyn/cm)

$$1 \text{ dyn/cm} = 10^{-3} \text{ N/m} = 1 \text{ mN/m} \quad (2.2.1)$$

Στο Σχήμα 2-3 βλέπουμε κομμάτι σύρμα σχήματος U και ένα κομμάτι σύρματος μικρού βάρους ( $w$ ) που ολισθαίνει στις πλευρές του πρώτου. Όταν η συσκευή βυθιστεί σε

σαπουνόνερο και στη συνέχεια ανυψωθεί, το κινητό σύρμα έλκεται προς τη κορυφή του U. Για να το κρατήσουμε σε ισορροπία πρέπει να ασκήσουμε δύναμη  $F$ , προς τα κάτω. Αν τραβήξουμε το κινητό τμήμα προς τα κάτω, αυξάνοντας το εμβαδό του υμένα, μόρια κινούνται από το εσωτερικό του υγρού στα επιφανειακά στρώματα. Έστω  $l$  το μήκος του κινητού τμήματος. Ο υμένας έχει δυο επιφάνειες, οπότε η δύναμη που προέρχεται από την επιφάνεια, δρα σε συνολικό μήκος  $2l$ . Η επιφανειακή τάση  $\gamma$  στον υμένα ορίζεται ως

$$\gamma = F/d \text{ , σε αυτή τη περίπτωση είναι } d = 2l \text{ και άρα } \gamma = F/2l \text{ .}$$



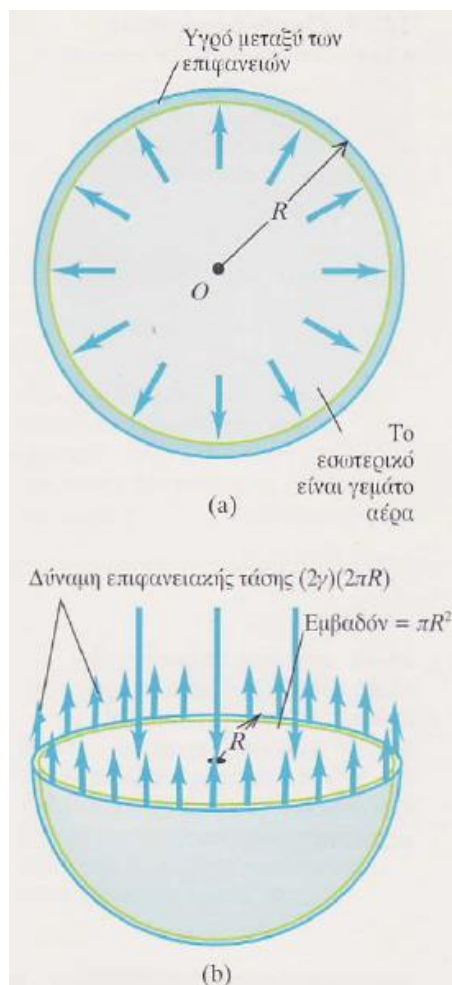
Σχήμα 2-3: Το οριζόντιο σύρμα που ολισθαίνει, βρίσκεται σε ισορροπία υπό την επενέργεια της δύναμης επιφανειακής τάσης με κατεύθυνση προς τα πάνω και της έλξης  $w+T$  με κατεύθυνση προς τα κάτω [22].

Παρατηρούμε λοιπόν, ότι η δημιουργία επιφάνειας σε ρευστό απαιτεί ενέργεια, η οποία αποθηκεύεται κοντά στην επιφάνεια και ονομάζεται επιφανειακή ενέργεια. Αυτός είναι και ο λόγος, που το μέσο τείνει να ελαχιστοποιήσει την εξωτερική του επιφάνεια. Ο ορισμός αυτός της επιφανειακής τάσης που σχετίζεται με τη περίπτωση μιας τεντωμένης ελαστικής μεμβράνης, μας οδηγεί στη θεώρηση ότι η επιφανειακή τάση προκαλεί έργο, το οποίο είναι αποθηκευμένο ως ενέργεια στην ελαστική μεμβράνη. Για αυτό το λόγο, συχνά η επιφανειακή τάση μετριέται και σε μονάδες ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας ( $\text{Joule/m}^2$ ). Ο

ορισμός ως ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας είναι πιο χρήσιμος για στερεά μέσα, ενώ για ρευστά είναι ως δύναμη ανά μονάδα μήκους. Η επιφανειακή τάση μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας, αφού έτσι μειώνονται οι διαμοριακοί δεσμοί.

Σε μια σαπουνόφουσκα ή σε σταγόνα υγρού, η επιφανειακή τάση προκαλεί διαφορά πίεσης μεταξύ του εσωτερικού και εξωτερικού τμήματος της επιφάνειας. Η σαπουνόφουσκα αποτελείται από δυο υμένες σφαιρικού σχήματος, οι οποίοι περιέχουν μεταξύ τους ένα λεπτό στρώμα υγρού. Οι υμένες τείνουν να συσταλούν για να ελαχιστοποιήσουν τη συνολική τους επιφάνεια, με αποτέλεσμα ο αέρας στο εσωτερικό να συμπιέζεται. Αυτή η υπερπίεση στο εσωτερικό της φυσαλίδας μπορεί να εκφραστεί συναρτήσει της ακτίνας  $R$  και του συντελεστή επιφανειακής τάσης  $\gamma$  του υγρού και είναι :

$$p - p_a = 2\gamma/R \quad (2.2.2)$$



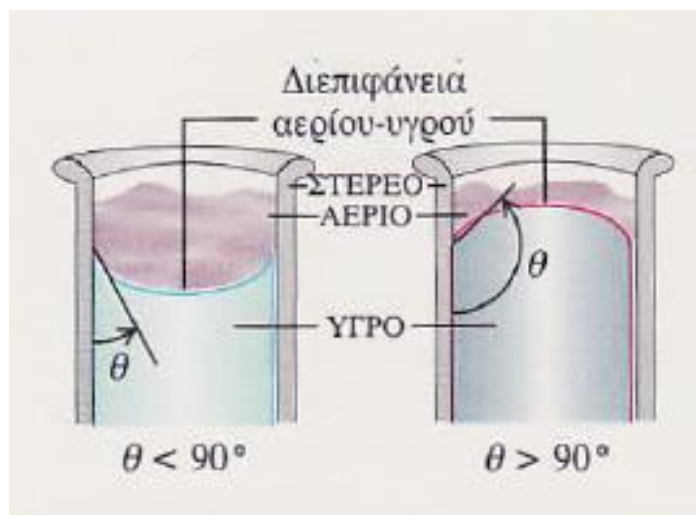
Σχήμα 2-4: (a) Τομή μιας σαπουνόφουσκας που δείχνει τις δυο επιφάνειες και το λεπτό στρώμα υγρού μεταξύ τους. (b) Ισορροπία της μισής σαπουνόφουσκας [22].

Η επιφανειακή τάση ενός υγρού , επίσης, αλλάζει σημαντικά όταν ξένα σωματίδια προς το υγρό συγκεντρώνονται στην επιφάνεια και είναι πολύ σημαντική σε μικρές σταγόνες ή φυσαλίδες, όπου η διαφορά πίεσης είναι της ίδια τάξης μεγέθους με τις μεταβολές πίεσης λόγω ροής.

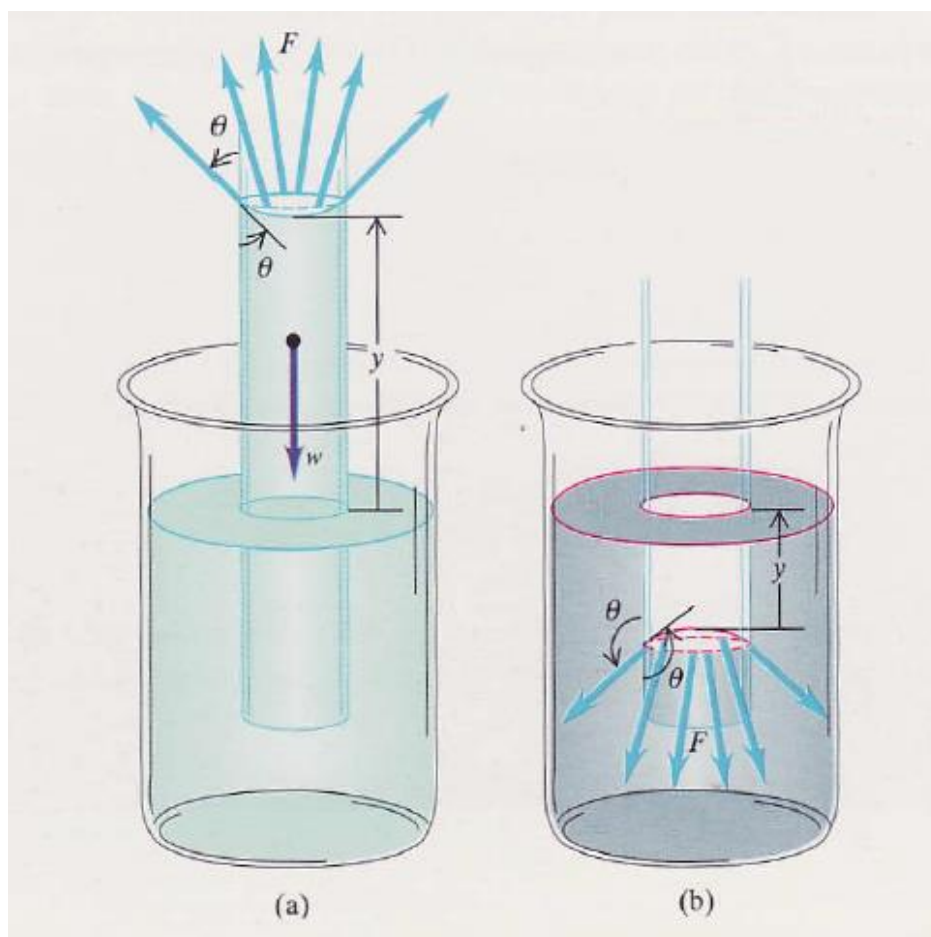
Κάποια άλλα φαινόμενα στα οποία η επιφανειακή τάση παίζει σημαντικό ρόλο, είναι σε εκτοξευτήρες νερού και σε εκτυπωτές πίδακα μελάνης, όπου καθορίζει το μέγεθος των σταγόνων καθώς ακόμα και κατά την ούρηση, όπου η παρατήρηση του μεγέθους και της απόστασης μεταξύ των σταγόνων μπορεί να δώσει χρήσιμες πληροφορίες για τη κατάσταση του ουρικού συστήματος. Επίσης, παρατηρούμε μικρά έντομα να περπατούν στο νερό χωρίς να βυθιστούν, διότι το βάρος τους δεν είναι ικανό να υπερνικήσει την ανωστική δύναμη, λόγω της επιφανειακής τάσης [20][21][22].

### **2.1.3 Τριχοειδή φαινόμενα**

Μια ακόμα χαρακτηριστική επίδραση της επιφανειακής τάσης, παρατηρούμε στην επαφή της ενδοεπιφάνειας δύο ρευστών (π.χ αέρας, νερό) με τα τοιχώματα ενός στερεού (π.χ τριχοειδής σωλήνας γυαλιού). Η ενδοεπιφάνεια σχηματίζει γωνία διαφορετική των  $90^\circ$  με τα τοιχώματα του στερεού,  $\theta$ , η οποία μετριέται μέσα στο υγρό και ονομάζεται γωνία επαφής. Όταν καμπυλώνεται προς τα πάνω η επιφάνεια (π.χ νερό, αέρας, γυαλί) η  $\theta$  είναι  $<90^\circ$  ενώ όταν καμπυλώνεται προς τα κάτω (π.χ υδράργυρος, αέρας, γυαλί), η  $\theta$  είναι  $>90^\circ$  (Σχήμα 2-5). Η άνοδος ή πτώση του ύψους του υγρού στο τριχοειδή σωλήνα οφείλεται στον ανταγωνισμό ανάμεσα στις δυνάμεις συνοχής των μορίων του υγρού και συνάφειας του υγρού με τα τοιχώματα του στερεού. Όταν η συνάφεια υπερτερεί της συνοχής, έχουμε άνοδο της υγρής στήλης ( $\theta < 90^\circ$ ) και τότε το υγρό “διαβρέχει” τα τοιχώματα του στερεού, ενώ στην αντίθετη περίπτωση έχουμε πτώση της υγρής στήλης ( $\theta > 90^\circ$ ) και το υγρό δε “διαβρέχει” το στερεό (Σχήμα 2-6). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται τριχοειδές ή τριχοειδικό και σε αυτό οφείλονται πολλά παρατηρήσιμα καθημερινά φαινόμενα, όπως η απορρόφηση του νερού από το χαρτί, η ανύψωση του λιωμένου κεριού ή λαδιού στο φυτίλι της λαμπάδας ή του καντηλιού, η άντληση του αίματος στα τριχοειδή αγγεία και πολλά άλλα [20][21][22].



Σχήμα 2-5: Όταν η διαχωριστική επιφάνεια υγρού-αερίου συναντά την επιφάνεια ενός στερεού, συνήθως καμπυλώνεται προς τα πάνω ή προς τα κάτω κοντά στην επιφάνεια του στερεού [22].



Σχήμα 2-6: Δυνάμεις επιφανειακής τάσης σε ένα υγρό μέσα σε τριχοειδή σωλήνα. Το υγρό (a) ανέρχεται αν  $\theta < 90^\circ$  ή (b) κατέρχεται, αν  $\theta > 90^\circ$ . Η διάμετρος του σωλήνα έχει μεγεθυνθεί για μεγαλύτερη ακρίβεια [22].

## 2.2 Επιφανειοδραστικές ουσίες

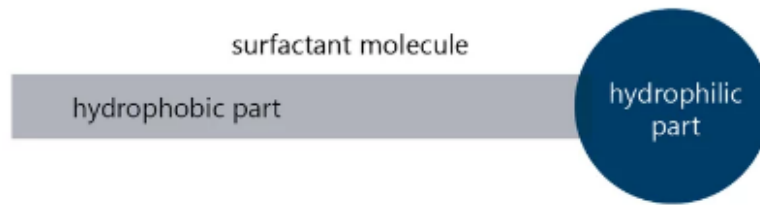
Κατά κανόνα, ένα επιφανειοδραστικό μόριο θα αποτελείται από δύο σημαντικά διαφορετικές χημικές ομάδες όσον αφορά τα χαρακτηριστικά πολικότητας και διαλυτότητάς του. Για βέλτιστη αποτελεσματικότητα, αυτές οι δύο ομάδες συνήθως θα απομονωθούν εντός της μοριακής δομής με σχετικά απλούς τρόπους, αν και ορισμένα επιφανειοδραστικά υλικά όπως πολυμερή, βιολογικά υλικά και άλλα πολύπλοκα συστήματα μπορεί να μην περιγράφονται τόσο εύκολα. Στο «τυπικό» μοντέλο, το τασιενεργό μόριο (μόριο επιφανειοδραστικού) έχει ένα τμήμα του σχετικά μη πολικό, ενώ το άλλο τμήμα με πολύ πολικό ή ιοντικό χαρακτήρα. Δεδομένου ότι τα περισσότερα συστήματα τα οποία χρησιμοποιούν τα επιφανειοδραστικά, βασίζονται στο νερό ή περιλαμβάνουν νερό ως μία από τις δύο φάσεις που έχουν διασύνδεση, η σύμβαση αναφέρεται στο μη πολικό, ή λιγότερο πολικό συστατικό ως «ουρά» (υδρόφοβη ομάδα) και στο πιο πολικό ή ιοντικό συστατικό ως «κεφαλή» (υδρόφιλη ομάδα). Τέτοια μόρια αναφέρονται γενικά ως «αμφιφιλικά».

Οι μοριακές δομές που έχουν κατάλληλες ιδιότητες διαλυτότητας για επιφανειοδραστική δραστηριότητα ποικίλλουν ανάλογα με τη φύση του συστήματος διαλυτών που θα χρησιμοποιηθούν και τις συνθήκες χρήσης. Στο νερό, η υδρόφοβη ομάδα (η «ουρά») μπορεί να είναι, για παράδειγμα, ένας υδρογονάνθρακας, μια αλκυλοαρυλομάδα ή ένας φθοράνθρακας ή αλυσίδα σιλοξάνης αρκετά μεγάλη ώστε να παράγει τα επιθυμητά χαρακτηριστικά διαλυτότητας όταν συνδέεται με κατάλληλη υδρόφιλη ομάδα.

Η πιο χρήσιμη χημική ταξινόμηση των επιφανειοδραστικών παραγόντων βασίζεται στη φύση του υδρόφιλου (κεφαλή), με υποομάδες να βασίζονται στη φύση του υδρόφοβου (ουρά). Οι τέσσερις βασικές κατηγορίες επιφανειοδραστικών ουσιών ορίζονται ως εξής:

- 1) Ανιονικό - Το υδρόφιλο είναι μια αρνητικά φορτισμένη ομάδα,
- 2) Κατιονικό - Το υδρόφιλο φέρει θετικό φορτίο
- 3) Μη ιονικό - Το υδρόφιλο δεν έχει κανένα φορτίο, αλλά αντλεί τη διαλυτότητά του στο νερό από πολύ πολικές ομάδες
- 4) Αμφιτεριονικό (Amphoteric και zwitterionic), στο οποίο το μόριο περιέχει, ή μπορεί ενδεχομένως να περιέχει, τόσο αρνητικό όσο και θετικό φορτίο.

Γενικά, η φύση των υδρόφοβων ομάδων μπορεί να είναι σημαντικά πιο ποικίλη από τη φύση των υδρόφιλων. [16]



Σχήμα 2-7: Δομή επιφανειοδραστικού μορίου [7]

Στην περίπτωση επιφανειοδραστικού διαλυμένου σε υδατικό μέσο, η υδρόφοβη ομάδα παραμορφώνει τη δομή του νερού, διασπώντας τους δεσμούς υδρογόνου μεταξύ τους. Ως αποτέλεσμα αυτής της παραμόρφωσης, μερικά από τα μόρια του επιφανειοδραστικού αποβάλλονται στις διεπαφές του συστήματος, με τις υδρόφοβες ομάδες τους να είναι προσανατολισμένες έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται η επαφή με τα μόρια του νερού. Η επιφάνεια του νερού καλύπτεται με ένα στρώμα επιφανειοδραστικών μορίων με τις υδρόφοβες ομάδες προσανατολισμένες κυρίως προς τον αέρα. Από τον αέρα, τα μόρια είναι ουσιαστικά μη πολικού χαρακτήρα, όπως και οι υδρόφοβες ομάδες. Αυτή η μείωση της ομοιότητας των δύο φάσεων που έρχονται σε επαφή μεταξύ τους στην επιφάνεια οδηγεί σε μείωση της επιφανειακής τάσης του νερού. Από την άλλη πλευρά, η παρουσία της λυόφιλης (υδρόφιλης) ομάδας εμποδίζει το επιφανειοδραστικό από το να αποβληθεί πλήρως από τον διαλύτη ως ξεχωριστή φάση, αφού αυτό θα απαιτούσε αφυδάτωση της υδρόφιλης ομάδας. Η αμφιπαθητική δομή του επιφανειοδραστικού συνεπώς, προκαλεί όχι μόνο συγκέντρωση του επιφανειοδραστικού στην επιφάνεια και μείωση της επιφανειακής τάσης του νερού, αλλά και τον προσανατολισμό του μορίου στην επιφάνεια με την υδρόφιλη ομάδα του στην υδατική φάση και την υδρόφοβη ομάδα του προσανατολισμένη μακριά από αυτή.

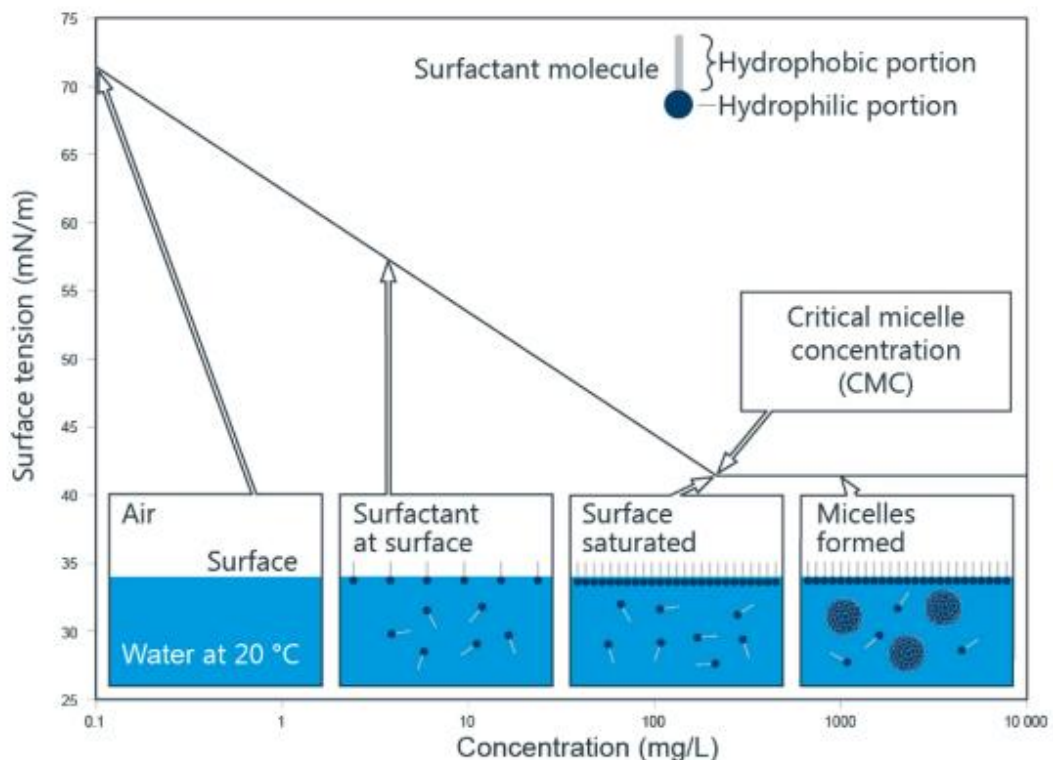
Τα επιφανειοδραστικά είναι από τα πιο ευπροσάρμοστα προϊόντα της χημικής βιομηχανίας. Εμφανίζονται σε τόσο διαφορετικά προϊόντα όπως τα λάδια κινητήρα που χρησιμοποιούμε στα αυτοκίνητά μας, τα φαρμακευτικά προϊόντα που παίρνουμε όταν είμαστε άρρωστοι, τα απορρυπαντικά που χρησιμοποιούμε στον καθαρισμό των ρούχων μας και στα σπίτια μας, οι λάσπες γεώτρησης που χρησιμοποιούνται για την αναζήτηση πετρελαίου και οι παράγοντες επίπλευσης που χρησιμοποιούνται για την εκμετάλλευση των μεταλλευμάτων. Τις τελευταίες δεκαετίες βλέπουμε την επέκταση των επιφανειοδραστικών

εφαρμογών σε υψηλούς τεχνολογικούς τομείς, όπως ηλεκτρονική εκτύπωση, μαγνητική καταγραφή, βιοτεχνολογία, μικροηλεκτρονική και ιογενής έρευνα.

### 2.2.1 Κρίσιμη συγκέντρωση μικκυλίων (CMC)

Τα επιφανειοδραστικά μόρια, τα οποία διαθέτουν υδρόφιλα και υδρόφοβα χαρακτηριστικά, συνδέονται μεταξύ τους σε υδατικά μέσα και σχηματίζουν δυναμικά συσσωματώματα που ονομάζονται μικκύλια. Αυτό συμβαίνει όταν η συγκέντρωση του επιφανειοδραστικού στο νερό ή στο διάλυμα νερού-NaCl, ξεπεράσει μια τιμή, η οποία ονομάζεται κρίσιμη συγκέντρωση μικκυλίων (CMC – Critical Micelle Concentration)[10].

Καθώς η συγκέντρωση ενός επιφανειοδραστικού αυξάνεται, η προσρόφηση λαμβάνει χώρα στην επιφάνεια μέχρι αυτή να επικαλυφθεί πλήρως. Σε αυτή την κατάσταση αντιστοιχεί η ελάχιστη τιμή της επιφανειακής τάσης. Τα μικκύλια σχηματίζονται στη φάση όγκου πάνω από τη μεταβατική συγκέντρωση που περιγράφεται ως CMC.

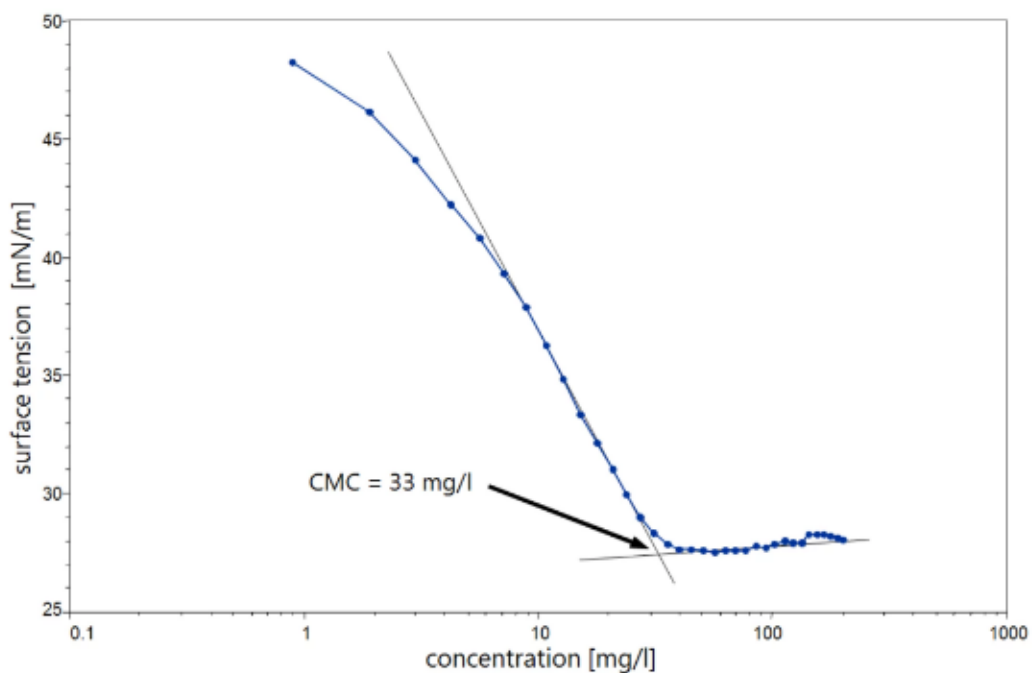


Σχήμα 2-8: Επιφανειακή τάση διαλύματος επιφανειοδραστικού με αυξανόμενη συγκέντρωση, σχηματισμός μικκυλίων [17]



Η γνώση της CMC είναι πολύ σημαντική κατά τη χρήση επιφανειοδραστικών. Καθώς η επιφανειακή τάση δεν μειώνεται περαιτέρω πάνω από τη CMC, σε πολλές διαδικασίες η CMC καθορίζει την περιοριστική συγκέντρωση για ουσιαστική χρήση. Όταν ο σχηματισμός μικκυλίων είναι επιθυμητός, π.χ. κατά τον καθαρισμό, η CMC είναι ένα μέτρο της αποτελεσματικότητας ενός επιφανειοδραστικού.

Η CMC προσδιορίζεται με ένα τενσιόμετρο, μετρώντας την επιφανειακή τάση μιας σειράς συγκεντρώσεων. Με τα καθαρά επιφανειοδραστικά, η επιφανειακή τάση εξαρτάται γραμμικά από τον λογάριθμο της συγκέντρωσης σε μεγάλο εύρος. Πάνω από τη CMC, η επιφανειακή τάση είναι σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητη από τη συγκέντρωση. Η CMC προκύπτει από την τομή μεταξύ της ευθείας παλινδρόμησης της γραμμικά εξαρτώμενης περιοχής και της ευθείας που διέρχεται από την καμπύλη, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2-9 [17].



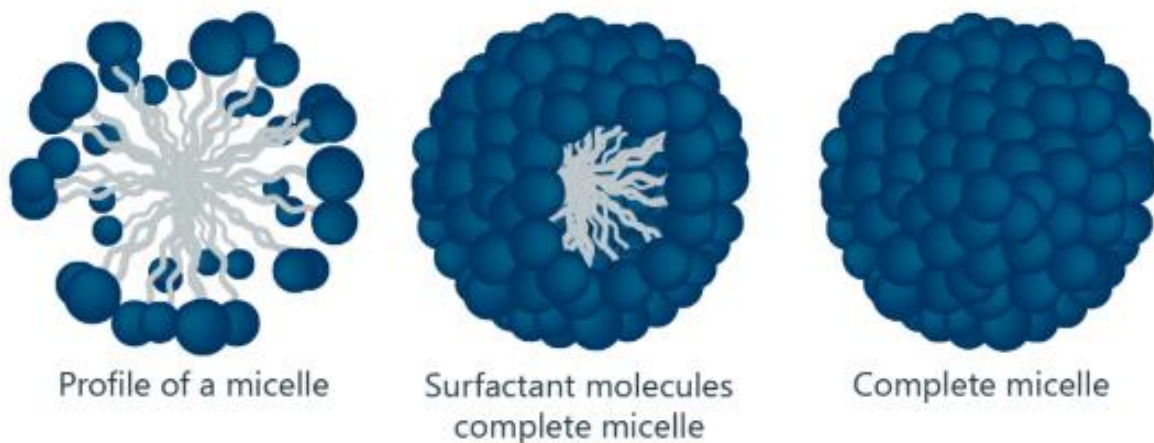
Σχήμα 2-9: Προσδιορισμός της CMC με τενσιόμετρο [17]

Υπάρχουν, επίσης τρεις άλλες κοινές μέθοδοι προσδιορισμού της CMC: (1) μέτρηση της αλλαγής του φάσματος UV-έναντι της βενζοϋλακετόνης, (2) μέτρηση του φάσματος εκπομπών φθορισμού μονομερών πυρενίου ή (3) μέτρηση της ηλεκτρικής αγωγιμότητας ενός ιονικού διαλύματος επιφανειοδραστικού καθώς η συγκέντρωση του αυξάνεται. Για να προσδιορίσουμε τη CMC, σχεδιάζουμε τη φυσική ιδιότητα ως συνάρτηση της συγκέντρωσης

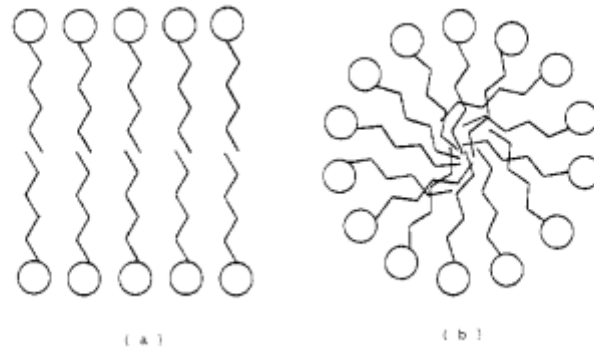
επιφανειοδραστικού και η CMC θα είναι το σημείο στο οποίο η κλίση αλλάζει (Σχήμα 2-15). Η CMC μειώνεται με την αύξηση του μήκους αλυσίδας υδρογονανθράκων μη πολικών ομάδων ή την προσθήκη ηλεκτρολυτών για ιονικά επιφανειοδραστικά [1]

### 2.2.2 Μικκύλια

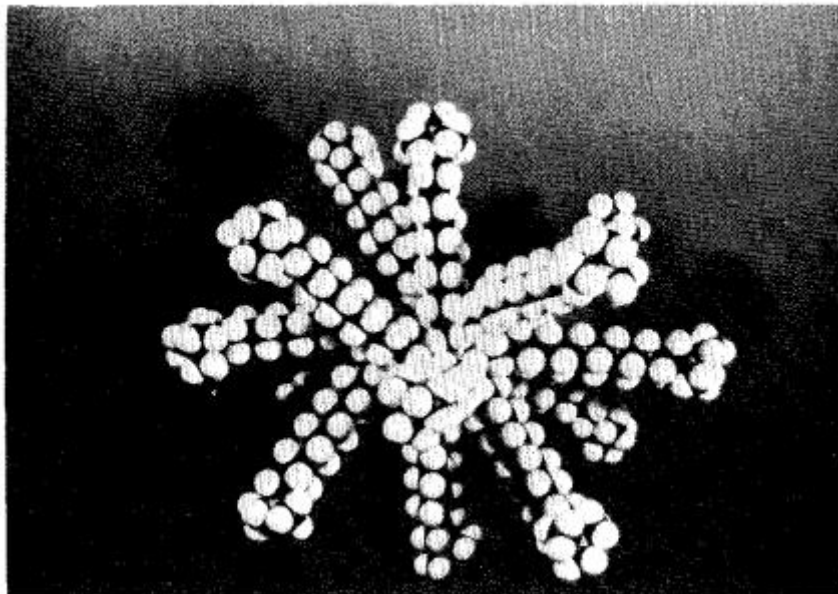
Τα μικκύλια είναι συσσωματώματα μορίων επιφανειοδραστικής ουσίας στην κύρια υγρή φάση. Οι ομάδες των μικκυλίων με μικρότερη συγγένεια με τη φάση όγκου (συνήθως οι υδρόφοβες ομάδες) είναι προσανατολισμένες προς τα μέσα. Τα μικκύλια στα οποία η υδρόφοβη ομάδα είναι προσανατολισμένη προς τα έξω περιγράφονται ως αντίστροφα μικκύλια. Τα μικκύλια μπορούν να ενσωματώσουν ουσίες που δεν είναι διαλυτές στο χύμα υγρό (π.χ. λάδι σε νερό). Η δράση των επιφανειοδραστικών ουσιών βασίζεται σε αυτό, π.χ. για πλύσιμο. Στις παρακάτω εικόνες φαίνονται διαφόρων ειδών μικκύλια [5].



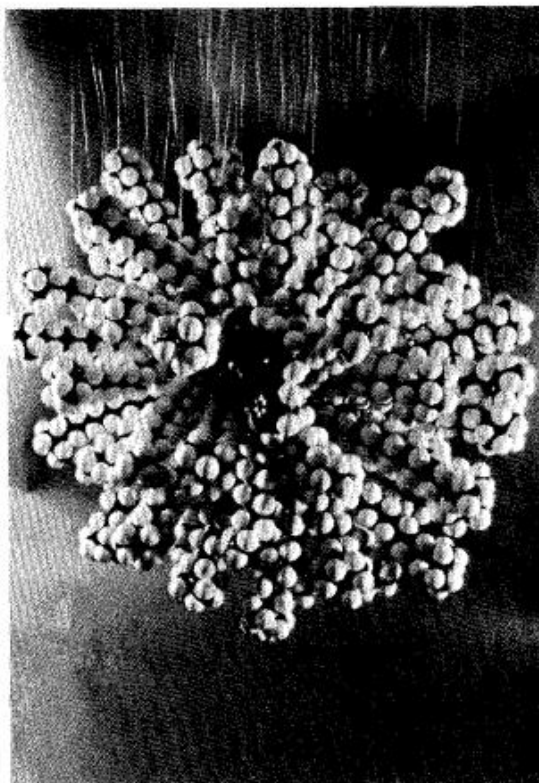
Σχήμα 2-10: Μορφή μικκυλίου [5]



Σχήμα 2-11: Σχηματική απεικόνιση τομής ενός (a) ελασματοειδούς μικκυλίου McBain και (b) σφαιρικού μικκυλίου Hartley [11]



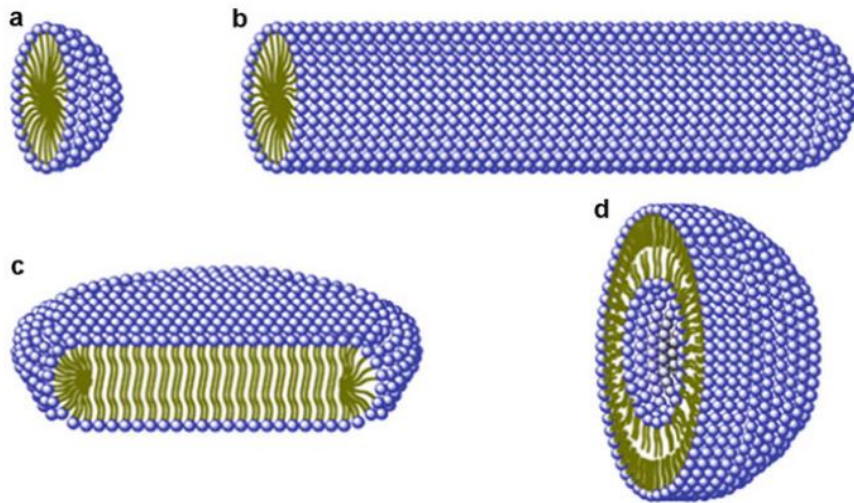
Σχήμα 2-12: Ένα μικκύλιο ιόντων δωδεκυλοτριμεθυλαμμωνίου με αριθμό συσσωμάτωσης 14 [11]



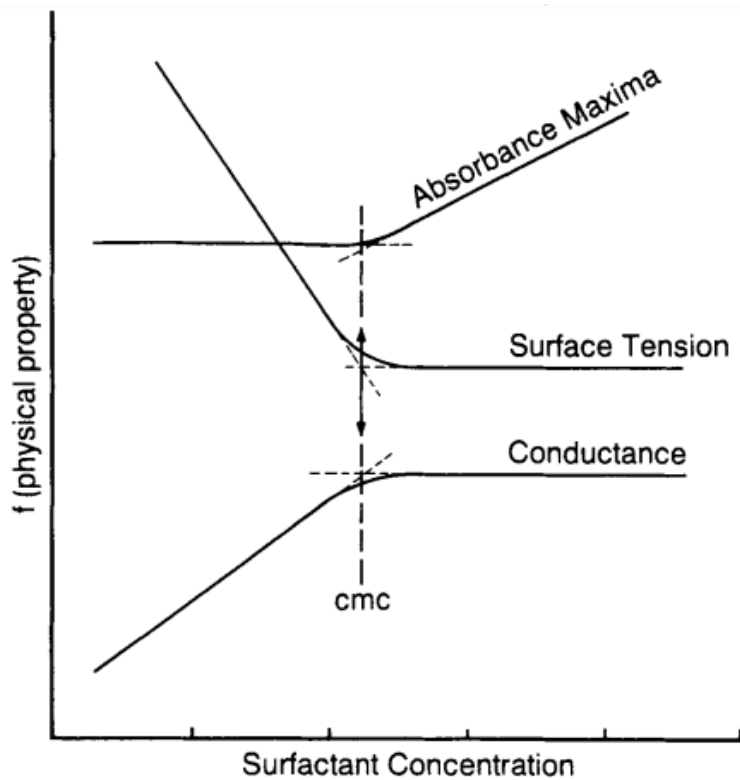
**Figure 5.** A dodecyltrimethylammonium ion micelle with an aggregation number of 58. All chains are fully extended. A pyrene molecule is situated among the chains close to the micelle surface.

Σχήμα 2-13: Ένα μικκύλιο ιόντων δωδεκυλοτριμεθυλαμμωνίου με αριθμό συσσωμάτωσης 58 [11]

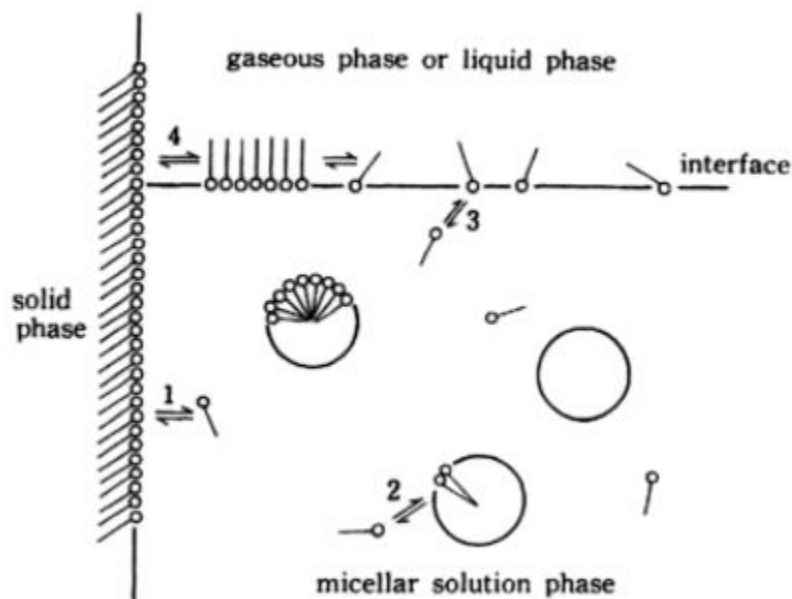
Τα αμφίφιλα σχηματίζουν μικκύλια με διάφορους τύπους σχημάτων, συμπεριλαμβανομένης της σφαίρας, κύλινδρο και δίσκο, ανάλογα με τη χημική δομή και τις περιβαλλοντικές συνθήκες (Σχήμα 2-14). Όταν ένα μικκύλιο σε σχήμα δίσκου μεγαλώνοντας αποκτά καμπυλότητα και γίνεται σφαίρα κατέχοντας τον διαλύτη μέσα, αυτό το συσσωμάτωμα ονομάζεται κυστίδιο. Οι κυτταρικές μεμβράνες είναι τυπικά παραδείγματα κυστιδίων [2].



Σχήμα 2-14: Απεικονίσεις (a) σφαιρικού μικκιλίου , (b) κυλινδρικού, (c) δισκοειδούς και (d) κυστιδίου [2]



Σχήμα 2-15: Μερικά παραδείγματα μεταβολής φυσικών ιδιοτήτων με την αύξηση της συγκέντρωσης του επιφανειοδραστικού [10]

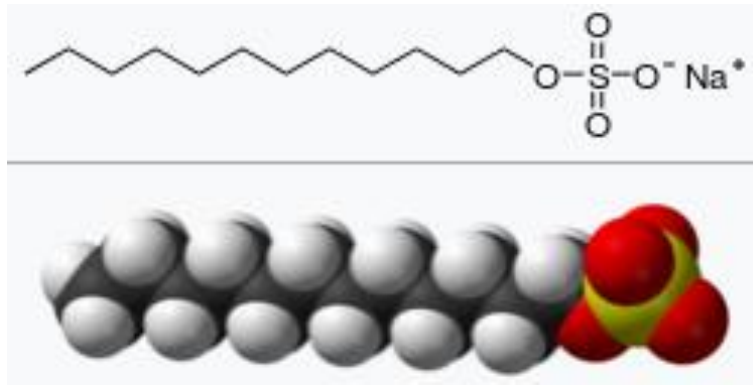


Σχήμα 2-16: Τέσσερις θεμελιώδεις διεργασίες για θερμοδυναμικές ισορροπίες αμφίφιλων μορίων σε διαλύματα: (1) διάλυση αμφίφιλων σε διάλυμα, (2) συσώρευση διαλυμένων αμφίφιλων, (3) προσρόφηση διαλυμένων αμφίφιλων στη διεπιφάνεια, (4) εξάπλωση αμφίφιλων από τη δική τους κύρια φάση όγκου, απευθείας στη διεπαφή [12]

### 2.2.3 Sodium dodecyl sulfate (SDS)

Το δωδεκυλοθειικό νάτριο (SDS) ή λαυρυλοθειικό νάτριο (SLS), μερικές φορές γραμμένο λαουρυλοθειικό νάτριο, είναι μια οργανική ένωση με τον τύπο  $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$ . Είναι ένα ανιονικό επιφανειοδραστικό που χρησιμοποιείται σε πολλά προϊόντα καθαρισμού και υγιεινής. Η υδρογονανθρακική του ουρά, που είναι το υδρόφοβο τμήμα του, σε συνδυασμό με μια πολική ομάδα κεφαλής (θειική ομάδα), που είναι το υδρόφιλο τμήμα, προσδίδουν στην ένωση αμφιφιλικές ιδιότητες που το καθιστούν χρήσιμο ως απορρυπαντικό. Το SDS είναι επίσης συστατικό μειγμάτων που παράγονται από φθηνά λάδια καρύδας και φοινικέλαιου. Το SDS είναι ένα κοινό συστατικό πολλών οικιακών προϊόντων καθαρισμού, προσωπικής υγιεινής και καλλυντικών, φαρμακευτικών και τροφίμων, καθώς και βιομηχανικών και εμπορικών συνθέσεων καθαρισμού και προϊόντων.

Έχει μοριακή μάζα 288,372 g/mol, πυκνότητα 1,01 g/cm<sup>3</sup>, σημείο τήξης 206 °C (403 °F / 479 K) και κρίσιμη συγκέντρωση μικκυλίων 8,2 mM στους 25 °C. Επίσης, είναι άοσμο και έχει συχνά τη μορφή λευκής σκόνης.



Σχήμα 2-17: Απεικόνιση ενός μορίου SDS [4]

## 2.3 Προσρόφηση στη διεπιφάνεια υγρού αερίου και μοντέλα ισορροπίας επιφανειακών τάσεων

Η πλεονάζουσα πυκνότητα/συγκέντρωση επιφάνειας  $\Gamma$ , είναι η σχετιζόμενη με την περιοχή συγκέντρωση ενός επιφανειοδραστικού στην επιφάνεια ή τη διεπιφάνεια. Έχει τη μονάδα  $\text{mol/m}^2$ . Λόγω της προσρόφησης ενός επιφανειοδραστικού στην επιφάνεια ή τη διεπιφάνεια, η συγκέντρωσή του σε αυτή την επιφάνεια είναι πολύ υψηλότερη από αυτή στη κύρια φάση. Η επιφανειακή τάση  $\gamma$  (ή η διεπιφανειακή τάση) συσχετίζεται άμεσα με αυτήν την πλεονάζουσα συγκέντρωση επιφάνειας  $\Gamma$

$$\Gamma = -\frac{1}{RT} \frac{d\gamma}{d \ln C} \quad (2.3.1)$$

Όπου  $R$  = παγκόσμια σταθερά των αερίων,  $T$  = απόλυτη θερμοκρασία,  $\gamma$  = επιφανειακή τάση,  $C$  = μοριακή συγκέντρωση επιφανειοδραστικού.

Αυστηρά μιλώντας, η πλεονάζουσα συγκέντρωση επιφάνειας  $\Gamma$  είναι η διαφορά μεταξύ της διεπιφανειακής συγκέντρωσης  $\Gamma_I$  και της συγκέντρωσης σε μια εικονική διεπαφή στο εσωτερικό της κύριας φάσης  $\Gamma_V$ :

$$\Gamma = \Gamma_I - \Gamma_V \quad (2.3.2)$$

Ωστόσο, καθώς η  $\Gamma_I$  είναι πολύ μεγαλύτερη από τη  $\Gamma_V$ , η πρώτη συνήθως εξισώνεται με τη συγκέντρωση στη διεπιφάνεια.

Η πλεονάζουσα συγκέντρωση επιφάνειας μπορεί να υπολογιστεί κατά τη μέτρηση της CMC από την κλίση της εξαρτώμενης από τη συγκέντρωση περιοχής της επιφανειακής

τάσης με βάση την εξίσωση που δίνεται παραπάνω. Το αποτέλεσμα μπορεί να συνδυαστεί με αποτελέσματα από μετρήσεις τενσιόμετρου πίεσης φυσαλίδων προκειμένου να προσδιοριστεί ο συντελεστής προσρόφησης [6].

Η περίσσεια επιφάνειας είναι η διαφορά μεταξύ της ποσότητας ενός συστατικού που υπάρχει πραγματικά στο σύστημα και αυτής που θα υπήρχε σε ένα σύστημα αναφοράς εάν η συγκέντρωση στις παρακείμενες φάσεις διατηρούνταν μέχρι μια επιλεγμένη διαχωριστική επιφάνεια, δηλαδή σαν να μην είχε καμία επίδραση η διεπαφή [19].

### 2.3.1 Εξίσωση Gibbs

Η μεταβολή της επιφανειακής τάσης ισορροπίας με αλλαγές στα χημικά δυναμικά όλων των διαλυμένων ουσιών σε σταθερή θερμοκρασία δίνεται από την εξίσωση προσρόφησης Gibbs [2]:

$$d\gamma = - \sum_{i=1}^{n-1} \bar{\Gamma}_i^{(\text{solvent})} d\mu_i \quad (2.3.3)$$

Όπου  $\bar{\Gamma}_i^{(\text{solvent})}$  είναι η αλγεβρική πλεονάζουσα πυκνότητα επιφάνειας του συστατικού  $i$  σε σχέση με τον διαλύτη. Η διαχωριστική επιφάνεια έχει θεωρηθεί έτσι ώστε η πλεονάζουσα επιφανειακή πυκνότητα του διαλύτη (ή κύριο συστατικό) να είναι μηδέν,  $\bar{\Gamma}_{\text{solvent}}^{(\text{solvent})} = 0$ . Η σχετική (ως προς το διαλύτη) πλεονάζουσα επιφανειακή πυκνότητα για το κάθε είδος  $i$ , είναι μια μετρήσιμη ποσότητα, ανεξάρτητα από τη θέση της διαχωριστικής επιφάνειας, και επομένως είναι «αμετάβλητη» [2].

Το χημικό δυναμικό ενός ιδανικού διαλύματος είναι,

$$\mu_i = \mu_i^\circ + \mathcal{R}T \ln c_i \quad (2.3.4)$$

Με αντικατάσταση της σχέσης (2.3.4) στη σχέση (2.3.3), προκύπτει η σχέση που συνδέει τη μεταβολή της επιφανειακής τάσης με τη μεταβολή της συγκέντρωσης ενός ιδανικού διαλύματος με επιφανειοδραστική ουσία ως συνάρτηση των πλεοναζουσών επιφανειακών πυκνοτήτων [2],

$$d\gamma = - \mathcal{R}T \sum_{i=1}^{n-1} \bar{\Gamma}_i d \ln c_i \quad (2.3.5)$$



Όπου  $\bar{\Gamma}_i$  (σε mol/1000m<sup>2</sup>) είναι οι αμετάβλητες ποσότητες που ορίζονται παραπάνω,  $C_i$  είναι η συγκέντρωση του επιφανειοδραστικού  $i$  στη κύρια φάση,  $\gamma$  η επιφανειακή τάση (σε mN/m = mJ/m<sup>2</sup>) και  $R= 8.31 \text{ Jmol}^{-1}\text{K}^{-1}$  [2].

### 2.3.2 Εξίσωση Langmuir

Η εξίσωση προσρόφησης Langmuir είναι μία από τις απλούστερες εξισώσεις δύο παραμέτρων που συσχετίζουν την πυκνότητα προσρόφησης στη διεπιφάνεια με την συγκέντρωση του επιφανειοδραστικού στη κύρια φάση. Το στρώμα προσρόφησης του επιφανειοδραστικού θεωρείται ως ένα δισδιάστατο πλέγμα, στο οποίο ο συνολικός αριθμός των θέσεων του πλέγματος αντιπροσωπεύει τον μέγιστο αριθμό μορίων επιφανειοδραστικού που μπορούν να “χωρέσουν” γεωμετρικά στη διεπιφάνεια. Όλες αυτές οι θέσεις έχουν ίσο εμβαδό, γεγονός το οποίο παρέχει έμμεσες πληροφορίες για την επιφανειακή διάταξη των μορίων. Η μέγιστη επιφανειακή συγκέντρωση επιφανειοδραστικού (ή μέγιστη πλεονάζουσα πυκνότητα επιφάνειας), συμβολίζεται  $\Gamma_m$  και είναι αντιστρόφως ανάλογη με την ελάχιστη επιφάνεια ανά προσροφημένο μόριο  $A_m$  ως εξής [2]:

$$A_m = \frac{10^{20}}{\Gamma_m N_A} \quad (2.3.6)$$

Όπου  $N_A$  ο αριθμός Avogadro. Η πειραματική μέτρηση της συγκέντρωσης του επιφανειοδραστικού στη επιφάνεια  $\Gamma$  είναι απίθανο να πάρει τη θεωρητική μέγιστη τιμή  $\Gamma_m$ .

Η εξίσωση Langmuir μπορεί να προκύψει είτε από κινητικές είτε από θερμοδυναμικές μελέτες. Μέσω της κινητικής μελέτης, η προσρόφηση μοντελοποιείται ως μια δυναμική ισορροπία μεταξύ της προσρόφησης σε και της εκρόφησης από το επιφανειακό πλέγμα. Ο ρυθμός προσρόφησης του επιφανειοδραστικού θεωρείται ανάλογος με τη συγκέντρωσή του στη κύρια φάση του διαλύματος και με το κλάσμα του πλέγματος που δεν καταλαμβάνεται από μόρια επιφανειοδραστικού. Ο ρυθμός εκρόφησης θεωρείται ανάλογος με το κλάσμα του πλέγματος που καταλαμβάνεται από το επιφανειοδραστικό, το οποίο συμβολίζεται με  $\theta$ . Η δυναμική αυτή ισορροπία εκφράζεται με την εξίσωση [2]:

$$k_a c(1 - \theta) = k_d \theta \quad (2.3.7)$$

Όπου  $k_a$  και  $k_d$  είναι οι σταθερές προσρόφησης και εκρόφησης αντίστοιχα. Ορίζοντας την μέγιστη ικανότητα προσρόφησης (ή μέγιστη συγκέντρωση του επιφανειοδραστικού) για

αυτό το μοντέλο ως  $\Gamma_{m,L}$  και τη σταθερά ισορροπίας ως  $K_L = k_a/k_d$ , προκύπτει μέσω της (2.3.7), η εξίσωση Langmuir [2]:

$$\theta = \frac{\Gamma}{\Gamma_{m,L}} = \frac{K_L c}{1 + K_L c} \quad (2.3.8)$$

Σε χαμηλές συγκεντρώσεις, όταν  $K_L c \ll 1$ , κλασματική συγκέντρωση στη διεπιφάνεια είναι καθαρά ανάλογη της συγκέντρωσης του επιφανειοδραστικού στην κύρια φάση ενώ σε υψηλές συγκεντρώσεις, όταν  $K_L c \gg 1$ , η κλασματική συγκέντρωση πλησιάζει τη μονάδα, που υποδηλώνει πλήρη κάλυψη της διεπιφάνειας [2].

Το μοντέλο Langmuir έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιείται κυρίως για την απλότητά του. Για να ληφθούν υπόψη οι μοριακές αλληλεπιδράσεις στη διεπιφάνεια και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ της διεπιφάνειας και της κύριας φάσης, χρειάζονται πιο προχωρημένα μοντέλα [2].

### 2.3.3 Εξίσωση Frumkin

Η εξίσωση προσρόφησης Frumkin είναι τριών παραμέτρων και συσχετίζει την επιφανειακή πυκνότητα προσρόφησης με τη συγκέντρωση στη κύρια φάση. Το διάλυμα θεωρείται ιδανικό και η διεπιφάνεια θεωρείται με πεπερασμένη χωρητικότητα,  $\Gamma_{m,F}$ , που γενικά διαπιστώνεται ότι είναι διαφορετική από αυτή του μοντέλου Langmuir,  $\Gamma_{m,L}$ , όταν οι εξισώσεις χρησιμοποιούνται με δεδομένα. Ωστόσο, στην εξίσωση Frumkin, η διεπιφάνεια προσρόφησης θεωρείται μη ιδανική επιτρέποντας τη μελέτη ελκτικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ ουρών και απωστικών αλληλεπιδράσεων μεταξύ κεφαλών. Τέτοιες αλληλεπιδράσεις συμβαίνουν μόνο μεταξύ γειτονικών προσροφημένων μορίων επιφανειοδραστικού στη διεπιφάνεια, κατά ζεύγος. Η εξίσωση Frumkin προκύπτει με παρόμοια κινητική μελέτη με αυτή της εξίσωσης Langmuir. Εδώ, ωστόσο, οι κινητικοί συντελεστές  $k_a$  και  $k_d$ , θεωρούνται συναρτήσεις της επιφανειακής κάλυψης με εξάρτηση τύπου Arrhenius [2]:

$$k_i = \kappa_i \exp\left(\frac{-E_i}{\mathfrak{R}T}\right) = \kappa_i \exp\left(\frac{-(E_i^\circ + \varepsilon_i \theta)}{\mathfrak{R}T}\right) \quad (2.3.9)$$

όπου το  $\kappa_i$  ( $i=a$  ή  $d$ ) είναι μια προεκθετική σταθερά και  $E_i$  είναι η μοριακή ενέργεια ενεργοποίησης, που θεωρείται ότι είναι γραμμική συνάρτηση της κλασματικής επιφανειακής κάλυψης. Η έκφραση της δυναμικής ισορροπίας που χρησιμοποιείται για την εξαγωγή της

ισόθερμης Langmuir (2.3.7), τροποποιείται χρησιμοποιώντας την (2.3.9) και καταλήγουμε στην [2]:

$$\kappa_a \exp\left(\frac{-E_a^\circ}{\mathfrak{R}T}\right) \exp\left(\frac{-\varepsilon_a \theta}{\mathfrak{R}T}\right) c(1-\theta) = \kappa_d \exp\left(\frac{-E_d^\circ}{\mathfrak{R}T}\right) \exp\left(\frac{-\varepsilon_d \theta}{\mathfrak{R}T}\right) \theta \quad (2.3.10)$$

Η εξίσωση αυτή με αναδιάταξη, μας δίνει την εξίσωση προσρόφησης Frumkin:

$$\theta = \frac{\Gamma}{\Gamma_{m,F}} = \frac{K_F \exp(-A\theta)c}{1 + K_F \exp(-A\theta)c} \quad (2.3.11)$$

Όπου η σταθερά ισορροπίας δίνεται ως:

$$K_F \equiv \frac{\kappa_a}{\kappa_d} \exp\left(\frac{E_d^\circ - E_a^\circ}{\mathfrak{R}T}\right) \quad (2.3.12)$$

Και η παράμετρος αλληλεπίδρασης δίνεται ως:

$$A = \frac{\varepsilon_a - \varepsilon_d}{\mathfrak{R}T} \quad (2.3.13)$$

Αυτή η παράμετρος αλληλεπίδρασης σχετίζεται στη συνέχεια με τη μεταβολή στις ενέργειες προσρόφησης με την επιφανειακή κάλυψη. Η εξίσωση προσρόφησης Frumkin, υποβαθμίζεται και καταλήγει στην εξίσωση Langmuir, όταν  $A=0$ . Όταν  $A<0$ , η σταθερά ισορροπίας αυξάνεται σε σχέση με αυτή στο μοντέλο Langmuir. Αυτή η υψηλότερη επιφανειακή συγγένεια υποδηλώνει ελκτικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων στη κύρια φάση και της διεπιφάνειας. Όταν  $A>0$ , η σταθερά ισορροπίας μειώνεται, υποδηλώνοντας απωστικές δυνάμεις μεταξύ της διεπιφάνειας και των μορίων στη κύρια φάση του διαλύματος. Χρησιμοποιείται, επίσης, και η αντίθετη σύμβαση πρόσημου [2].

### 2.3.4 Εξίσωση Davies

Τα μοντέλα Langmuir και Frumkin χαρακτηρίζονται ως ψευδο-μη-ιοντικά μοντέλα, διότι δεν λαμβάνουν υπόψη τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις μεταξύ των μορίων. Το αντίθετο συμβαίνει με τα ιοντικά μοντέλα. Η κατανομή των ελεύθερων ιόντων στο διάλυμα, είναι ένας συνδυασμός των ηλεκτροστατικών αλληλεπιδράσεων και της τυχαιότητας λόγω της αύξησης της εντροπίας. Η ουδετερότητα του ηλεκτρικού φορτίου διατηρείται στη κύρια φάση του διαλύματος καθώς και στη διεπιφάνεια, η οποία ορίζεται ως το άθροισμα του προσροφημένου επιφανειοδραστικού και του διάχυτου στρώματος ανιόντων. Ωστόσο, το ηλεκτρικό φορτίο εντός της διεπιφάνειας δεν είναι ομοιόμορφα κατανομημένο, με

αποτέλεσμα την ύπαρξη ενός περίσσιου επιφανειακού φορτίου, ή δυναμικού στην διεπιφάνεια. Το δυναμικό αυτό της διεπιφάνειας συμβολίζεται ως  $\phi_0$ . Τα ιοντικά μοντέλα λαμβάνουν υπόψη το φορτίο των ιόντων και αυτό το δυναμικό, επιτρέποντας το λογισμό της επίδρασης της συγκέντρωσης του άλατος (NaCl) στη πυκνότητα προσρόφησης στη διεπιφάνεια. Ένα τέτοιο μοντέλο, είναι αυτό που χρησιμοποιεί την εξίσωση προσρόφησης Davies [2].

Η εξίσωση προσρόφησης Davies είναι ένα μοντέλο δύο παραμέτρων που συσχετίζει την προσρόφηση στη διεπιφάνεια με τη συγκέντρωση στη κύρια φάση και το δυναμικό της διεπιφάνειας. Η κύρια φάση του διαλύματος θεωρείται ιδανική και η διεπιφάνεια θεωρείται ως ένα τοπικά φορτισμένο στρώμα με πεπερασμένη χωρητικότητα  $\Gamma_{m,D}$  (τιμή που διαφέρει από τις τιμές  $\Gamma_{m,L}$  και  $\Gamma_{m,F}$ ). Η κινητική σταθερά εκρόφησης θεωρείται ως συνάρτηση του δυναμικού της διεπιφάνειας [2]:

$$k_d = \kappa_d \exp\left(\frac{zF\phi_0}{\mathcal{R}T}\right) \quad (2.3.14)$$

Η εξίσωση δυναμικής ισορροπίας 2.3.7 γίνεται:

$$k_a c(1 - \theta) = \kappa_d \exp\left(\frac{zF\phi_0}{\mathcal{R}T}\right) \theta \quad (2.3.15)$$

Η τελευταία εξίσωση 2.3.15, αναδιατάσσεται και προκύπτει η εξίσωση προσρόφησης Davies:

$$\theta = \frac{\Gamma}{\Gamma_{m,D}} = \frac{K_D \exp\left(\frac{-zF\phi_0}{\mathcal{R}T}\right) c}{1 + K_D \exp\left(\frac{-zF\phi_0}{\mathcal{R}T}\right) c} \quad (2.3.16)$$

Όπου η σταθερά ισορροπίας ορίζεται ως  $K_D = \kappa_a / \kappa_d$ . Όταν  $\phi_0 = 0$ , η εξίσωση (2.3.16) υποβαθμίζεται στην εξίσωση προσρόφησης Langmuir, με  $K_D = K_L$  και  $\Gamma_{m,D} = \Gamma_{m,L}$ . Για επιδράσεις ασθενών φορτίων, το δυναμικό της διεπιφάνειας είναι γραμμικός ανάλογο με την επιφάνεια κάλυψης του επιφανειοδραστικού και μια διαταραχή πρώτης τάξης στο δυναμικό της διεπιφάνειας θα μετατρέψει το μοντέλο Davies στο μοντέλο Frumkin [2].

### 2.3.5 Εξίσωση Frumkin-Davies

Τα δύο μοντέλα που αναφέρθηκαν προηγουμένως, δηλαδή τα μοντέλα Frumkin και Davies, συνδυάζονται στο μοντέλο Frumkin-Davies, στο οποίο λαμβάνονται υπόψη οι ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις μέσω του Davies, αλλά και οι διαμοριακές αλληλεπιδράσεις στην διεπιφάνεια μέσω του Frumkin. Η κύρια διαφορά μεταξύ του συνδυαστικού μοντέλου και του Davies, είναι ότι η υπόθεση της μη αλληλεπίδρασης μεταξύ των μορίων στη διεπιφάνεια, χαλαρώνει, επιτρέποντας ηλεκτροστατικές και διαμοριακές αλληλεπιδράσεις επιφανειοδραστικού με την παράμετρο  $A$  του μοντέλου Frumkin [2].

Η κύρια φάση θεωρείται και πάλι ιδανική και η διεπιφάνεια είναι ένα τοπικά φορτισμένο στρώμα πεπερασμένης χωρητικότητας  $\Gamma_{m,C}$  (τιμή που διαφέρει από τις τιμές  $\Gamma_{m,L}$ ,  $\Gamma_{m,F}$  και  $\Gamma_{m,D}$  των προηγούμενων μοντέλων). Χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις δυναμικής ισορροπίας των προηγούμενων μοντέλων, η νέα εξίσωση δυναμικής ισορροπίας προκύπτει [2]:

$$\begin{aligned} & \kappa_a \exp\left(\frac{-E_a^\circ}{\mathfrak{R}T}\right) \exp\left(\frac{-\varepsilon_a \theta}{\mathfrak{R}T}\right) c(1-\theta) \\ & = \kappa_d \exp\left(\frac{-E_d^\circ}{\mathfrak{R}T}\right) \exp\left(\frac{-\varepsilon_d \theta}{\mathfrak{R}T}\right) \exp\left(\frac{zF\phi_o}{\mathfrak{R}T}\right) \theta \end{aligned} \quad (2.3.17)$$

Η εξίσωση αναδιατάσσεται και προκύπτει η εξίσωση προσρόφησης Frumkin-Davies:

$$\theta = \frac{\Gamma}{\Gamma_{m,C}} = \frac{K_C \exp(-A\theta) \exp\left(\frac{-zF\phi_o}{\mathfrak{R}T}\right) c}{1 + K_C \exp(-A\theta) \exp\left(\frac{-zF\phi_o}{\mathfrak{R}T}\right) c} \quad (2.3.18)$$

Όπου η παράμετρος ισορροπίας ορίζεται από την εξίσωση (2.3.12) και η παράμετρος αλληλεπίδρασης ορίζεται από την εξίσωση (2.3.13) [2].

## 2.4 Μέθοδοι μέτρησης επιφανειακής τάσης

Υπάρχουν πολλές μέθοδοι μέτρησης επιφανειακής και διεπιφανειακής τάσης, μεταξύ των οποίων μπορούν να αναφερθούν η τριχοειδική άνοδος (Capillary rise method), η μέθοδος του δακτυλίου, η μέθοδος της μέγιστης πίεσης φυσαλίδας (MBPM – Maximum Bubble Pressure Method), η pendant drop, sessile drop, Wilhelmy plate method, Du Noüy ring method, Spinning drop method, Drop volume method και πολλές άλλες [15].

- Μέθοδος δακτυλίου σύμφωνα με τον Du Noüy: Η δύναμη που ασκείται σε έναν βέλτιστα διαβρέξιμο δακτύλιο ως αποτέλεσμα της τάσης του αποσυρόμενου υγρού ελάσματος κατά την αφαίρεση του δακτυλίου μετράται σε αυτήν τη μέθοδο.
- Μέθοδος πλάκας σύμφωνα με τον Wilhelmy: Η δύναμη που επενεργεί σε μια βέλτιστα διαβρέξιμη πλάκα η οποία είναι βυθισμένη κατακόρυφα στο υγρό μετράται σε αυτή τη μέθοδο.
- Μέθοδος όγκου σταγόνας: Ο όγκος μιας σταγόνας υγρού που παράγεται σε ένα κατακόρυφο τριχοειδές μετράται τη στιγμή της αποκόλλησής του. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται κυρίως για τη μέτρηση της διεπιφανειακής τάσης .
- Μέθοδος pendant drop: Το σχήμα μιας σταγόνας που αιωρείται από μια βελόνα καθορίζεται από την επιφανειακή τάση και το βάρος της σταγόνας. Η επιφανειακή τάση μπορεί να εξακριβωθεί από την εικόνα της σταγόνας, χρησιμοποιώντας ανάλυση σχήματος σταγόνας.

Έχουν χρησιμοποιηθεί διπλοί τριχοειδείς σωλήνες, ευθύγραμμα τμήματα, πλάκες, δίσκοι, παράλληλες πλάκες, οριζόντιοι τριχοειδείς σωλήνες κ.λπ. Στην πραγματικότητα η μελέτη των τεχνικών μέτρησης επιφανειακής τάσης θα μπορούσε να περιγραφεί ως μελέτη επιστημονικής εφευρετικότητας και ευρηματικότητας [15]. Η μέθοδος που θα μας απασχολήσει στη παρούσα εργασία είναι η μέθοδος της μέγιστης πίεσης φυσαλίδας (MBPM), η οποία επεξηγείται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

## 3 Πειραματική διαδικασία

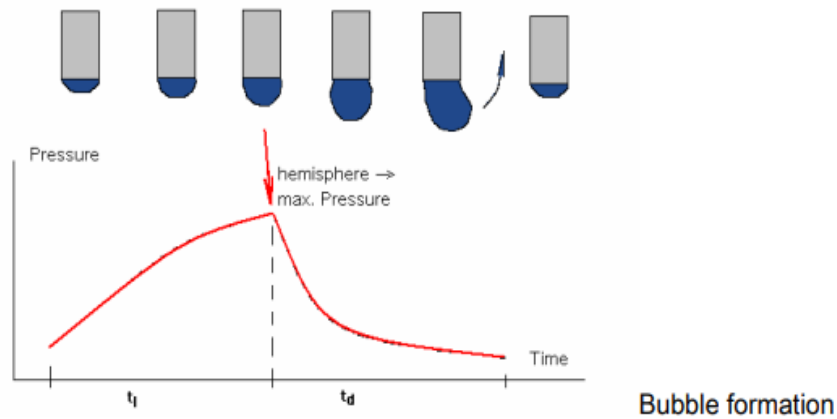
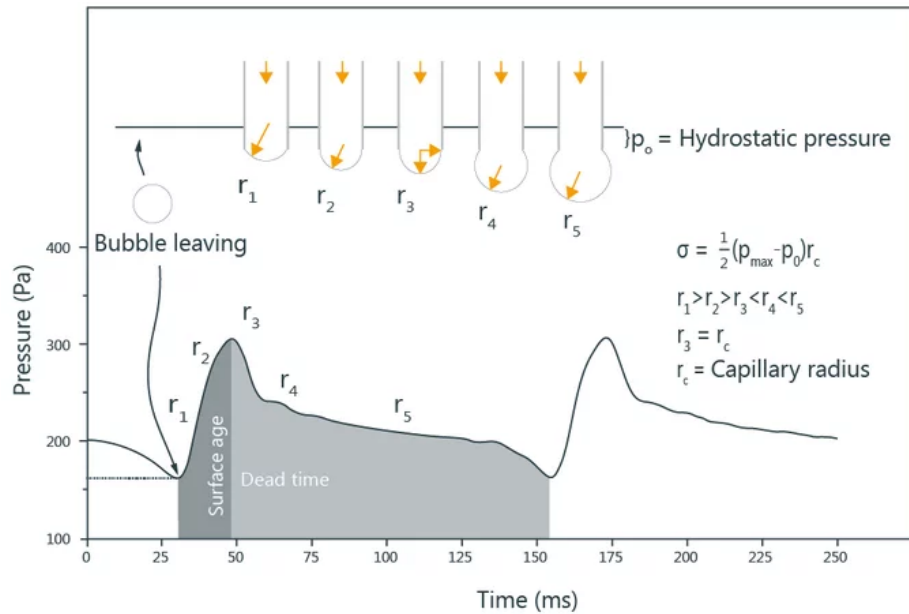
### 3.1 Μέθοδος μέγιστης πίεσης φυσαλίδας (MBPM)

Η μέθοδος της μέγιστης πίεσης φυσαλίδας χρησιμοποιείται ευρέως για τον χαρακτηρισμό της δυναμικής της προσρόφησης διάφορων επιφανειοδραστικών. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη περίπτωση γρήγορης προσρόφησης, η οποία είναι χαρακτηριστική για τις συγκεντρώσεις επιφανειοδραστικών κοντά και πάνω από τη κρίσιμη συγκέντρωση μικκυλίων (CMC). Στις πρώτες εργασίες η MBPM εφαρμόστηκε σε καθαρά υγρά και αργότερα σε διαλύματα επιφανειοδραστικών [18].

Η μέθοδος βασίζεται στην ιδέα ότι μια φυσαλίδα αερίου που αναπτύσσεται στην κορυφή ενός βυθισμένου τριχοειδούς σωλήνα είναι σταθερή καθώς η πίεση του αερίου αυξάνεται έως ότου η φυσαλίδα γίνει ημισφαιρική. Στο σημείο αυτό, η ακτίνα καμπυλότητάς της είναι ελάχιστη. Πέρα από αυτό, η φυσαλίδα είναι ασταθής και μεγαλώνει εκρηκτικά μέχρι να αποκολληθεί. Λόγω της αεροδυναμικής αντίστασης του τριχοειδή αυτή η ταχεία ανάπτυξη της φυσαλίδας παράγει πάντα πτώση της πίεσης στο άκρο και, εάν ο όγκος που τροφοδοτεί το τριχοειδές είναι περιορισμένος, επίσης πτώση στο άλλο άκρο από αυτό. Έτσι μια μέγιστη πίεση  $P$  μετριέται όταν η ακτίνα της φυσαλίδας είναι ακριβώς ίση με αυτή του τριχοειδούς σωλήνα,  $r$  [13].

Η μέθοδος, επίσης, μπορεί να δώσει ακριβείς τιμές της επιφανειακής τάσης ισορροπίας καθώς και της δυναμικής επιφανειακής τάσης σε καθορισμένους χρόνους γήρανσης φυσαλίδων, όπως ορίζονται από τα διαστήματα δημιουργίας φυσαλίδων [14].

Η MBPM βασίζεται στη μέτρηση της μέγιστης πίεσης σε μια φυσαλίδα που αναπτύσσεται στην άκρη ενός τριχοειδούς σωλήνα, ο οποίος είναι βυθισμένος στο υπό μελέτη υγρό. Όταν μια φυσαλίδα αναπτύσσεται, η ακτίνα καμπυλότητας της μειώνεται έως το σχηματισμό ημισφαιρίου και ακολούθως αυξάνεται έως το διαχωρισμό της από το σωλήνα. Έτσι στο ημισφαιρικό μέγεθος, η μετρούμενη πίεση είναι η μέγιστη. Αφού η φυσαλίδα περάσει αυτή τη μέγιστη πίεση, μεγαλώνει γρήγορα, διαχωρίζεται από τον τριχοειδή σωλήνα και σχηματίζεται μια νέα φυσαλίδα.



Σχήμα 3-1: Διαγράμματα μετρούμενης πίεσης φυσαλίδας κατά το σχηματισμό της [9],[8]

Η επιφανειακή τάση υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης Laplace, λαμβάνοντας την τριχοειδική ακτίνα ως ακτίνα καμπυλότητας.

$$P_{\max} = 2 \gamma / r$$

Η υδροστατική πίεση, στο βάθος  $h$  που βυθίζεται ο τριχοειδής σωλήνας, προστίθεται

$$P_{\max} = 2 \gamma / r + \Delta \rho g h$$

Όπου  $\Delta \rho$  είναι η διαφορά πυκνότητας του υγρού από του αέρα και  $g$  η σταθερά της βαρύτητας.

Ο χρόνος από την έναρξη της ανάπτυξης της φυσαλίδας έως το ημισφαιρικό της σχήμα, ονομάζεται χρόνος ζωής ή χρόνος ωρίμανσης  $t_i$  και το διάστημα από αυτό το ημισφαίριο έως την αναχώρηση της φυσαλίδας ονομάζεται αδρανής χρόνος (deadtime)  $t_d$ . Το άθροισμα και των δύο χρόνων μας δίνει το χρόνο φυσαλίδας  $t_b = t_i + t_d$  [9].



## 3.2 Πείραμα

### 3.2.1 Πειραματικός εξοπλισμός

Όλες οι μετρήσεις έγιναν με τη χρήση του тенσιόμετρου πίεσης φυσαλίδων BP50 της KRÜSS, το οποίο έχει τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά:

Πίνακας 3-1: Τεχνικά χαρακτηριστικά тенσιόμετρου BP50

Measuring range	
Surface tension	15 to 100 mN/m
Temperature	5 to 95 °C
Resolution	
Surface tension	0.1 Mn/m
Temperature	0.1 °C
Surface age	15 to 16000 ms



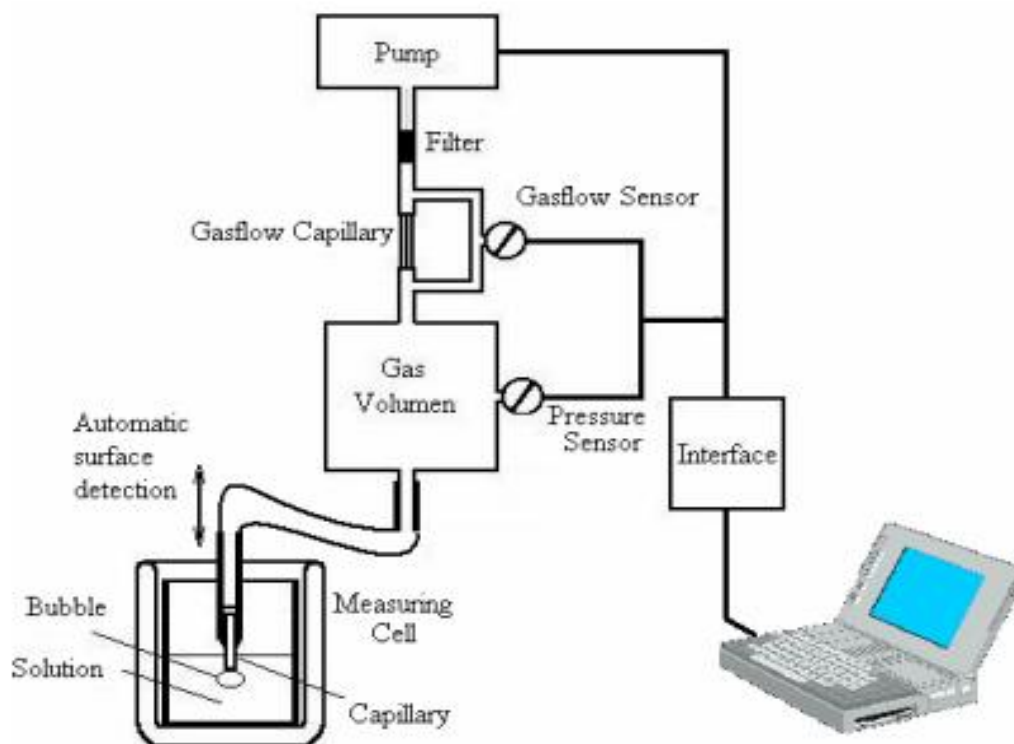
Σχήμα 3-2: Τенσιόμετρο BP50

Το тенσιόμετρο είναι μια συσκευή για τη μέτρηση της επιφανειακής τάσης ενός υγρού ή/και της διεπιφανειακής τάσης μεταξύ δύο υγρών. Στο тенσιόμετρο πίεσης φυσαλίδων, μετρείται η μέγιστη εσωτερική πίεση μιας φυσαλίδας αερίου που σχηματίζεται σε ένα υγρό μέσω ενός τριχοειδούς σωλήνα [8].

Για τη μέτρηση των ποσοτήτων SDS και NaCl χρησιμοποιήθηκε ζυγαριά ακριβείας της τάξης του χιλιοστού του γραμμαρίου και για την ανάμιξη των μιγμάτων απιονισμένου νερού, SDS και NaCl χρησιμοποιήθηκε μαγνητικός αναδευτήρας. Το тенσιόμετρο είναι συνδεδεμένο με τον ηλεκτρονικό υπολογιστή του εργαστηρίου, ο οποίος επεξεργάστηκε και αποθήκευσε τα δεδομένα των μετρήσεων μέσω του λογισμικού Laboratory Desktop της KRÜSS.

### 3.2.2 Πειραματική διάταξη

Στο Σχήμα 3-3 φαίνεται η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε. Η αντλία παράγει μια συνεχή ροή αερίου, η οποία μετρείται από τον αισθητήρα ροής (Gasflow sensor). Ο σωλήνας ροής (Gasflow capillary) μαζί με το δοχείο (Gas volume) αποσβένουν το σύστημα και επιτρέπουν την ομαλή δημιουργία φυσαλίδων. Ο αισθητήρας πίεσης μετρά τη πίεση στο δοχείο, η οποία είναι ανάλογη της μέγιστης πίεσης στο άκρο του τριχοειδή σωλήνα. Η αντλία και οι δύο αισθητήρες ελέγχονται από υπολογιστή μέσω ηλεκτρονικής πλακέτας. Ο υπολογιστής συλλέγει τα δεδομένα μέτρησης, υπολογίζει την δυναμική επιφανειακή τάση μεταξύ άλλων και παρουσιάζει όλα τα αποτελέσματα σε πραγματικό χρόνο [9].

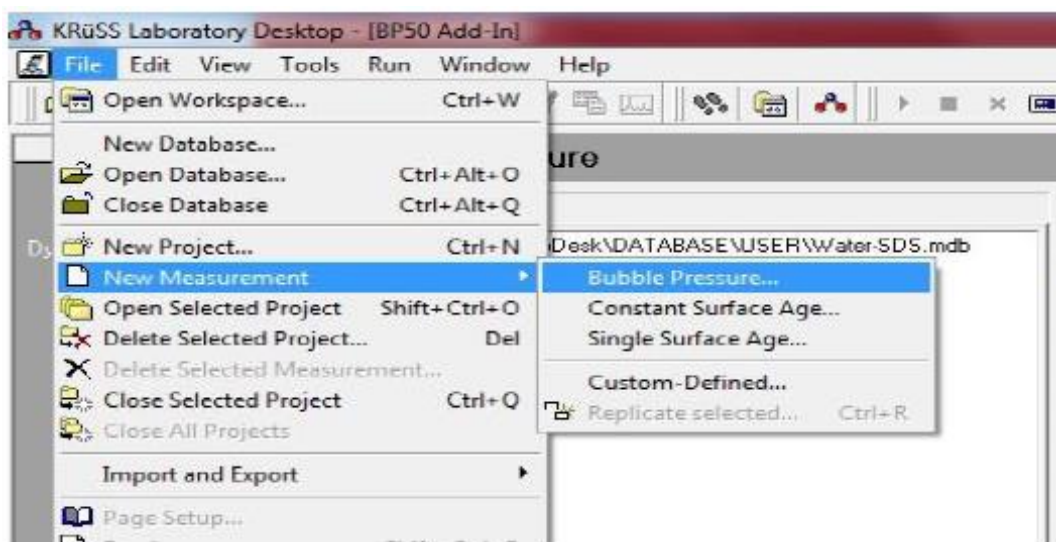


Σχήμα 3-3: Απεικόνιση πειραματικής διάταξης [9]

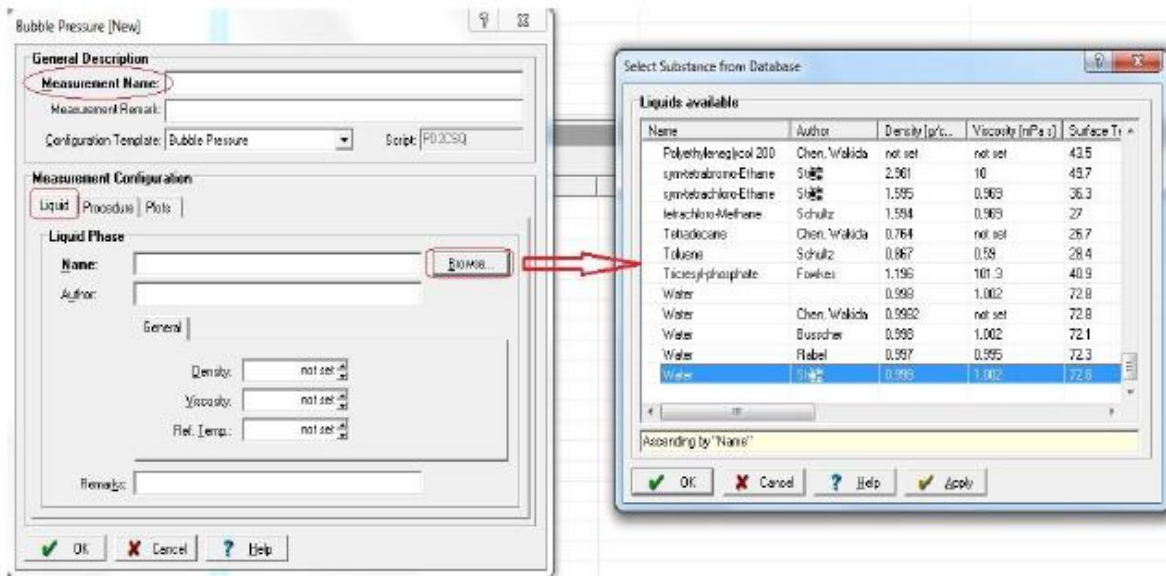
**Surface age** (γήρανση της επιφάνειας): είναι η χρονική περίοδος από την έναρξη της παραγωγής μιας επιφάνειας ή μιας διεπαφής (μιας φυσαλίδας) έως τη στιγμή της παρατήρησης ή της μέτρησης, δηλαδή έως τον χρόνο που θα επιτευχθεί η μέγιστη πίεση στη φυσαλίδα. Η μέγιστη πίεση συμβαίνει την στιγμή που η διάμετρος της φυσαλίδας είναι ακριβώς ίση με την διάμετρο του τριχοειδούς σωλήνα. Στα διαλύματα με επιφανειοδραστικά, η επιφανειακή τάση εξαρτάται από το surface age. Η εξαρτώμενη από το χρόνο τιμή αναφέρεται ως **δυναμική** επιφανειακή τάση, σε αντίθεση με την επιφανειακή τάση σε θερμοδυναμική ισορροπία.

Με το συγκεκριμένο тенσιόμετρο μπορούμε να μετρήσουμε την επιφανειακή τάση με τρεις διαφορετικές μεθόδους, την *Bubble Pressure*, την *Constant Surface Age* και τη *Single Surface Age*. Οι μετρήσεις στη παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκαν με τη χρήση της μεθόδου *Bubble Pressure*, κατά την οποία η επιφανειακή τάση μετριέται σαν συνάρτηση του surface age.

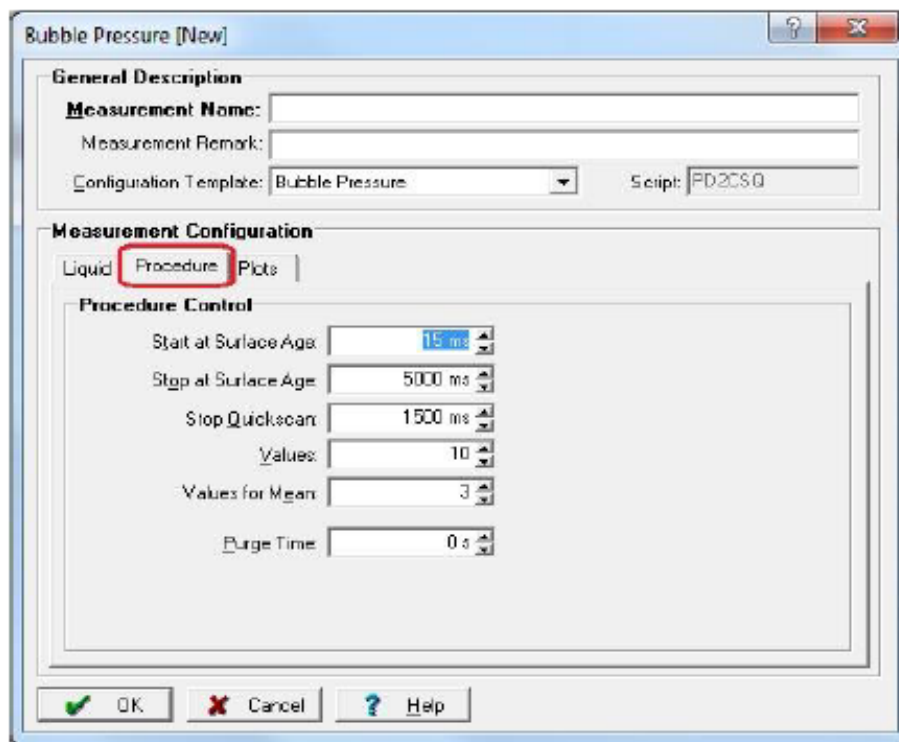
Αρχικά επιλέγουμε τη μέθοδο μέτρησης μέσω της καρτέλας *File/New Measurement* (Σχήμα 3-4). Αυτή η επιλογή εμφανίζει ένα νέο παράθυρο, στο οποίο δίνουμε όνομα στη μέτρηση (Σχήμα 3-5), επιλέγουμε το υγρό προς μέτρηση και καθορίζουμε τις παραμέτρους της μέτρησης (Σχήμα 3-6). Οι παράμετροι αυτές διασαφηνίζονται παρακάτω.



Σχήμα 3-4: Επιλογή νέας μέτρησης με τη μέθοδο Bubble Pressure.



Σχήμα 3-5: Επιλογή του υγρού μέσου προς μέτρηση



Σχήμα 3-6: Επιλογή των παραμέτρων μέτρησης

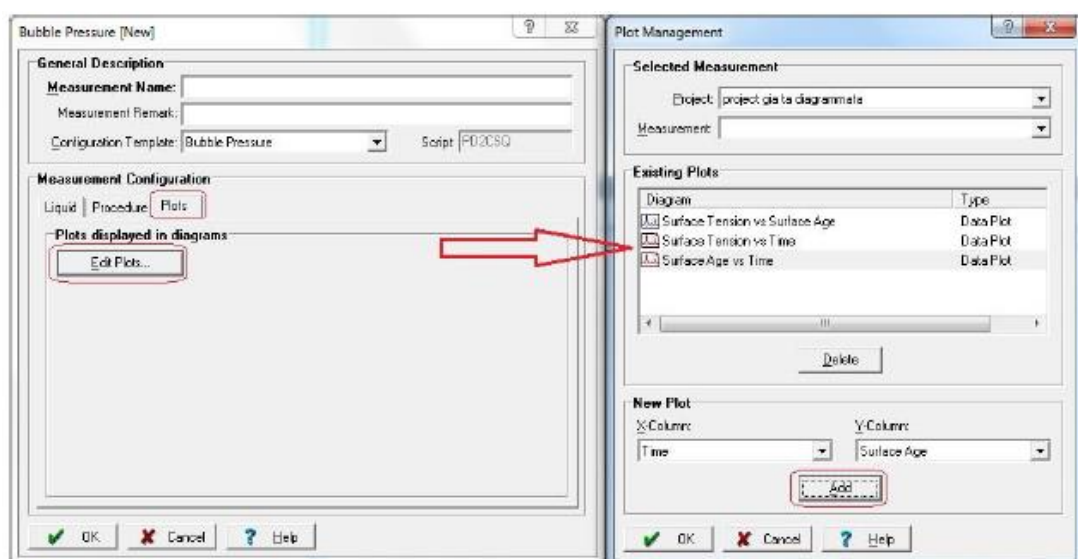
**Start/Stop at surface age:** Καθορίζει τον αρχικό και τελικό χρόνο, αντίστοιχα, της μέτρησης της επιφανειακής τάσης.

**Stop Quickscan:** Η τιμή της παραμέτρου αυτής ορίζει τον surface age της φυσαλίδας μέχρι τον οποίον το σύστημα πετυχαίνει με ακρίβεια την επιθυμητή τιμή (Quick-Scan mode). Μετά από αυτή την τιμή ο ρυθμός παραγωγής των φυσαλίδων σταδιακά μειώνεται συνεχώς (Float mode). Με αποτέλεσμα οι τυχόν επιθυμητές τιμές για το surface age της φυσαλίδας να πραγματοποιούνται προσεγγιστικά, μειώνοντας όμως τον συνολικό χρόνο της μέτρησης

**Values for Mean:** Καθορίζει τον αριθμό των μετρήσεων από τις οποίες θα υπολογιστεί ο αριθμητικός μέσος όρος για να υπολογιστεί η τιμή της επιφανειακής τάσης.

**Purge Time:** Η παράμετρος αυτή καθορίζει τη διάρκεια της εκκαθάρισης του τριχοειδή σωλήνα πριν από κάθε μέτρηση. Η εκκαθάριση αυτή πραγματοποιείται με μια απότομη ροή αέρα, ώστε να απομακρυνθούν τυχόν υπολείμματα στο σωλήνα.

Επίσης, υπάρχει η δυνατότητα για πρόσθεση περαιτέρω διαγραμμάτων, εκτός του *Surface Tension vs Surface Age* που είναι το προκαθορισμένο από το πρόγραμμα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3-7, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής διαγραμμάτων *Surface Tension vs Time* και *Surface Age vs Time*.



Σχήμα 3-7: Επιλογή διαγραμμάτων προς εμφάνιση

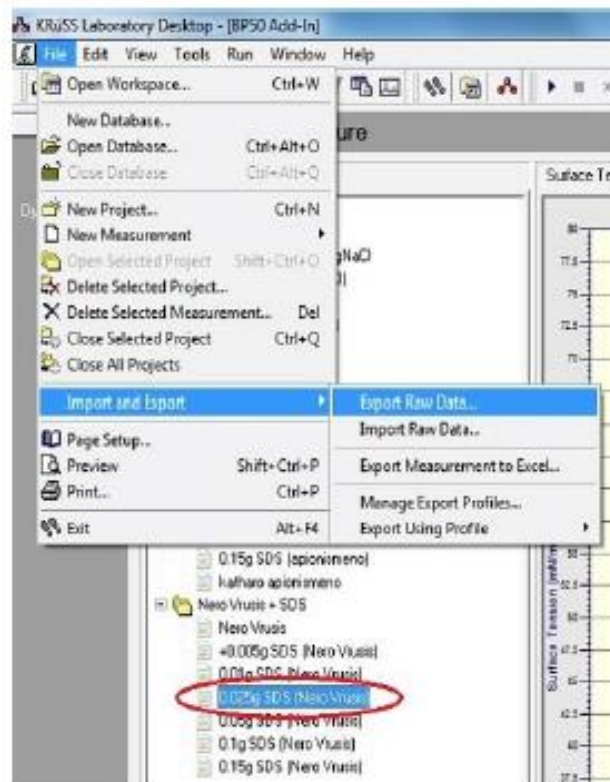
### 3.2.3 Περιγραφή πειραματικής διαδικασίας

Για την παρούσα εργασία, πραγματοποιήθηκαν 6 ομάδες μετρήσεων σε διαλύματα απιονισμένου νερού με 10mM NaCl και επιφανειοδραστικού SDS. Η κάθε ομάδα είχε διαφορετικές συγκεντρώσεις SDS. Οι ομάδες μετρήσεων παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 3-2: Ομάδες πειραματικών μετρήσεων

ΟΜΑΔΑ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ SDS ΣΕ g/100ml ΝΕΡΟΥ	ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ SDS ΣΕ mM	ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ
1 <sup>η</sup> ομάδα	0,005g/100ml	0,173 mM	5
2 <sup>η</sup> ομάδα	0,01g/100ml	0,347 mM	4
3 <sup>η</sup> ομάδα	0,02g/100ml	0,694 mM	3
4 <sup>η</sup> ομάδα	0,04g/100ml	1,387 mM	3
5 <sup>η</sup> ομάδα	0,085g/100ml	2,948 mM	5
6 <sup>η</sup> ομάδα	0,155g/100ml	5,375 mM	3

Πριν από κάθε μέτρηση το δοχείο ενός λίτρου καθαρίστηκε αρχικά με νερό βρύσης χωρίς τη χρήση οποιουδήποτε καθαριστικού και μετά με ακετόνη. Το δοχείο αφέθηκε αρκετή ώρα, ώστε να εξατμιστεί όλη η ποσότητα ακετόνης στα τοιχώματα. Επίσης, πριν από κάθε μέτρηση έγινε αλλαγή του τριχοειδούς σωλήνα και αντικατάσταση με νέο καθώς και βαθμονόμηση του τενσιόμετρου όπως προβλέπεται από το εγχειρίδιο του. Το διάλυμα έγινε σε όγκο νερού 1 λίτρου και η ανάδευση έγινε για περίπου 45 λεπτά, ώστε να υπάρχει όσο το δυνατόν καλύτερη ανάμιξη του NaCl και του SDS στο νερό. Από το μίγμα ενός λίτρου για κάθε μέτρηση, έγιναν διάφορες μετρήσεις σε δοχείο 100ml με ονομασίες Test 1,2,3... ενώ για την μέτρηση με 0,085g SDS/100ml νερού δημιουργήθηκαν 2 διαφορετικά διαλύματα ενός λίτρου και ονομάστηκαν Test 1, Test 2, για το πρώτο διάλυμα και Test 11, Test 12, Test 13 για το δεύτερο διάλυμα. Όλα τα δεδομένα των μετρήσεων αποθηκεύτηκαν σε αρχεία μορφής .txt και .xls μέσω της δυνατότητας που δίνει το λογισμικό KRUSS Laboratory Desktop για εξαγωγή όλων των δεδομένων. Η διαδικασία φαίνεται παρακάτω, στο Σχήμα 3-8. Όλα αυτά τα δεδομένα παρατίθενται στο ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ σε μορφή πινάκων.



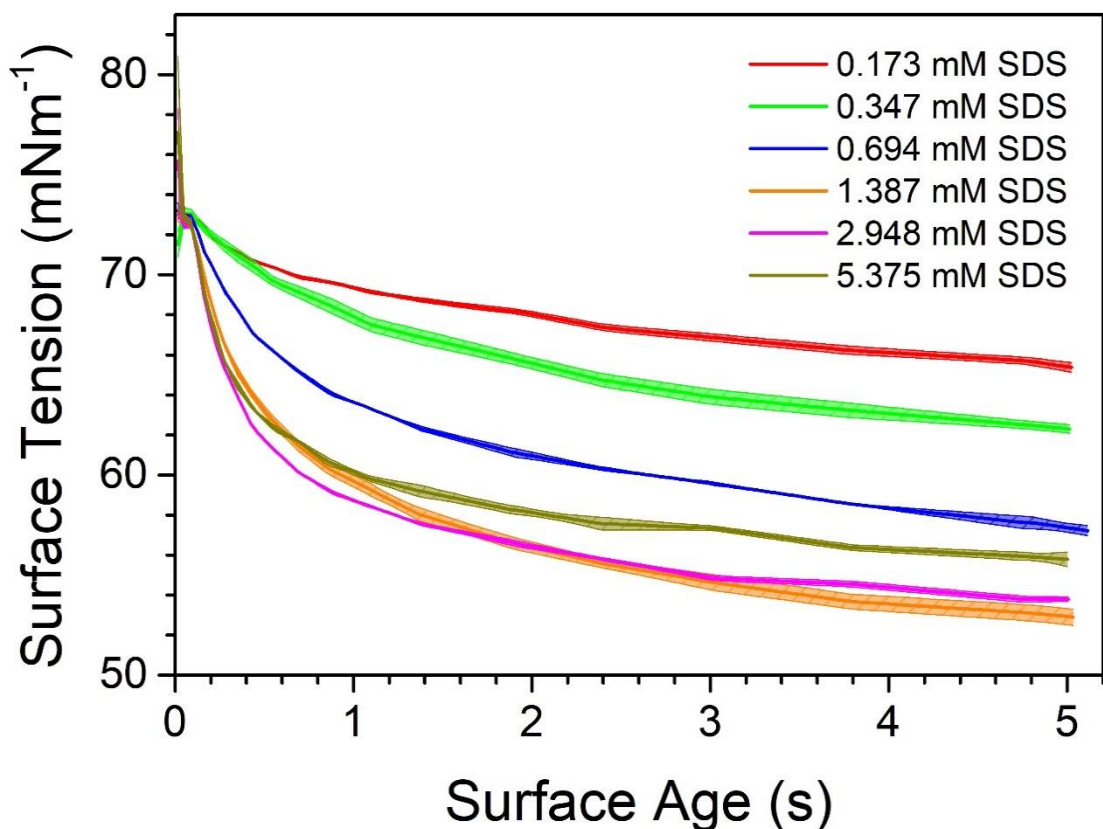
Σχήμα 3-8: Εξαγωγή δεδομένων



## 4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

### 4.1 Γενικά αποτελέσματα

Αρχικά, παραθέτουμε ένα γενικό διάγραμμα επιφανειακής τάσης – χρόνου γήρανσης φυσαλίδας με όλες τις καμπύλες που αντιστοιχούν στις συγκεντρώσεις SDS στο διάλυμα απιονισμένου νερού με 10mM NaCl.



Διάγραμμα 1: Επιφανειακής τάσης – χρόνου γήρανσης φυσαλίδας για διάφορες συγκεντρώσεις SDS στο διάλυμα μας.

Διαπιστώνουμε την εξάρτηση της επιφανειακής τάσης με το χρόνο γήρανσης. Καθώς ο χρόνος γήρανσης φυσαλίδας αυξάνεται, η επιφανειακή τάση μειώνεται όλο και με μικρότερο ρυθμό και τείνει σε μια τιμή. Για πολύ μικρούς χρόνους γήρανσης οι τιμές της επιφανειακής τάσης διαφέρουν πολύ με αυτές για μεγάλους χρόνους και παρατηρούμε ότι η πειραματική μέτρηση στους πολύ μικρούς χρόνους γήρανσης έχει μεγάλες αποκλίσεις. Αυτή η εξάρτηση της επιφανειακής τάσης με το χρόνο δημιουργίας και εξέλιξης μεγέθους της

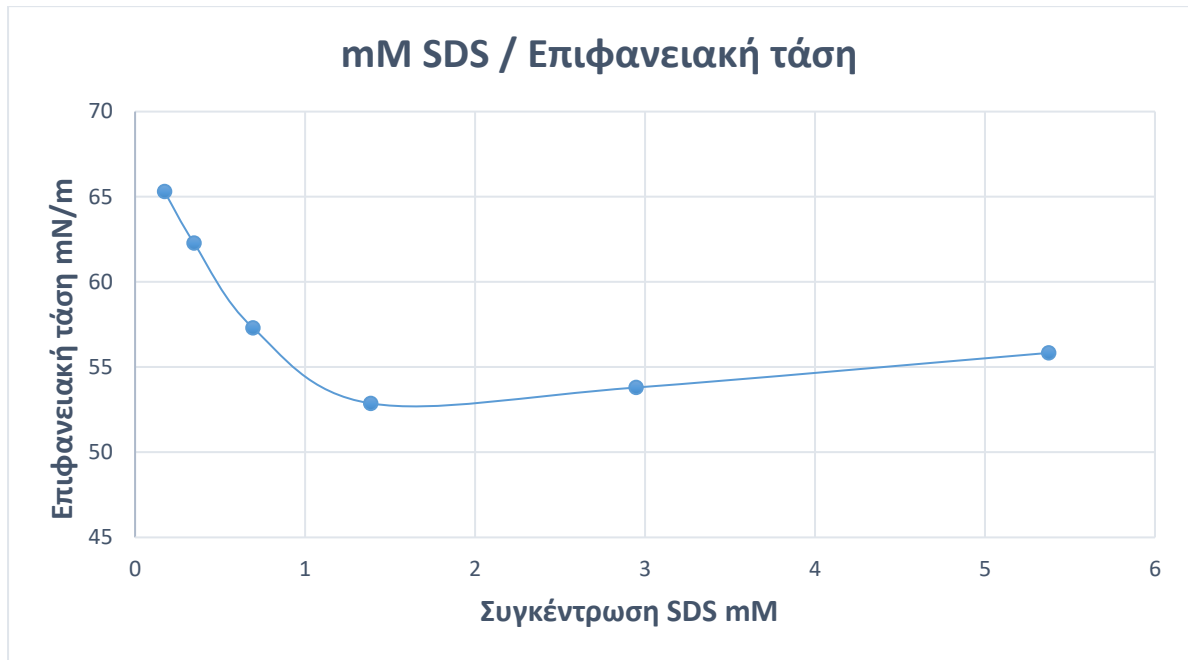


φουσαλίδας, μας δείχνει τη δυναμική επίδραση του επιφανειοδραστικού στο διάλυμα, καθώς απαιτείται χρόνος για να γίνει η προσρόφηση του επιφανειοδραστικού στη διεπιφάνεια της φουσαλίδας από τον κύριο όγκο του διαλύματος. Είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο χρόνος έκθεσης της φουσαλίδας στο δείγμα μας, τόσο πιο έγκυρη τιμή θα εξάγουμε από τη μέτρηση. Για τη συγκεκριμένη εργασία, έγιναν μετρήσεις μέχρι τη τιμή 5000ms για το surface age. Η τιμή αυτή είναι σχετικά χαμηλή, αλλά μας δίνει μια καλή σχετική τιμή για την επιφανειακή τάση. Αυτή τη τιμή θα την εξάγουμε από το μέσο όρο των μετρήσεων επιφανειακής τάσης για 5000ms surface age και για κάθε διαφορετική ομάδα μετρήσεων. Παρακάτω δίνεται ο πίνακας με την επιφανειακή τάση στις αντίστοιχες συγκεντρώσεις SDS.

Πίνακας 4-1: Τιμές επιφανειακής τάσης στις αντίστοιχες συγκεντρώσεις SDS

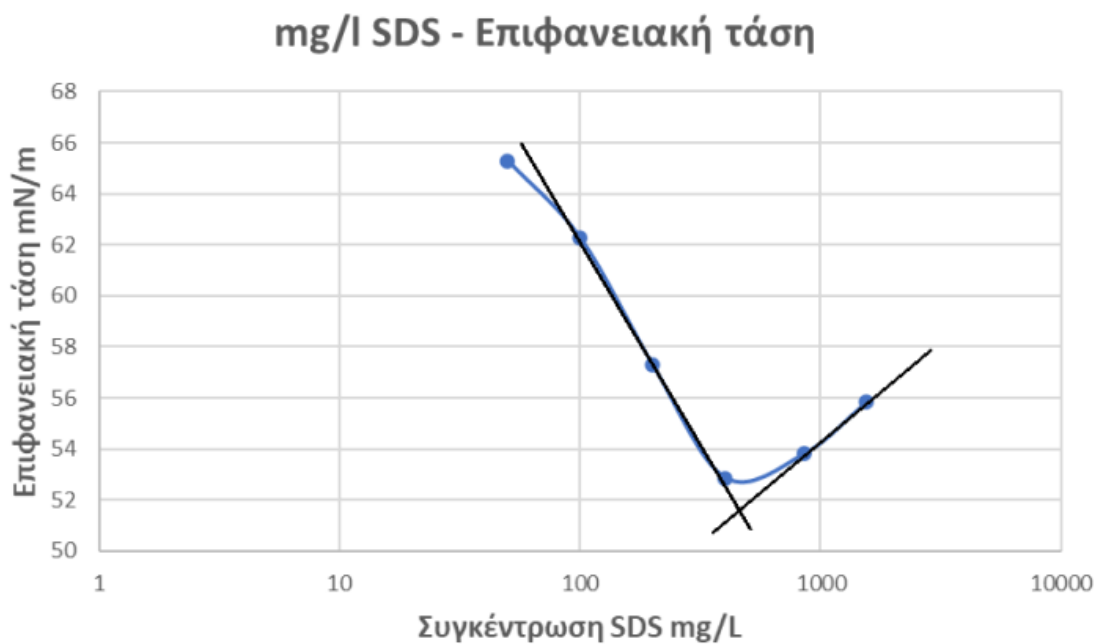
<b>Mm SDS</b>	<b>Επιφανειακή τάση mN/m</b>
0,173	65,3
0,347	62,275
0,694	57,3
1,387	52,86667
2,948	53,8
5,375	55,83333

Δημιουργούμε, ακολούθως, το διάγραμμα που αντιστοιχεί σε αυτόν τον πίνακα.



Διάγραμμα 2: Επιφανειακής τάσης – συγκέντρωσης SDS στο διάλυμα.

Παρατηρούμε ότι για συγκεντρώσεις SDS μικρότερες της CMC, όσο αυξάνεται η συγκέντρωση του SDS στο διάλυμα, τόσο η επιφανειακή τάση μειώνεται. Όταν η συγκέντρωση του SDS προσεγγίσει τη τιμή της CMC, τότε αυτή η μείωση της επιφανειακής τάσης σταματάει.

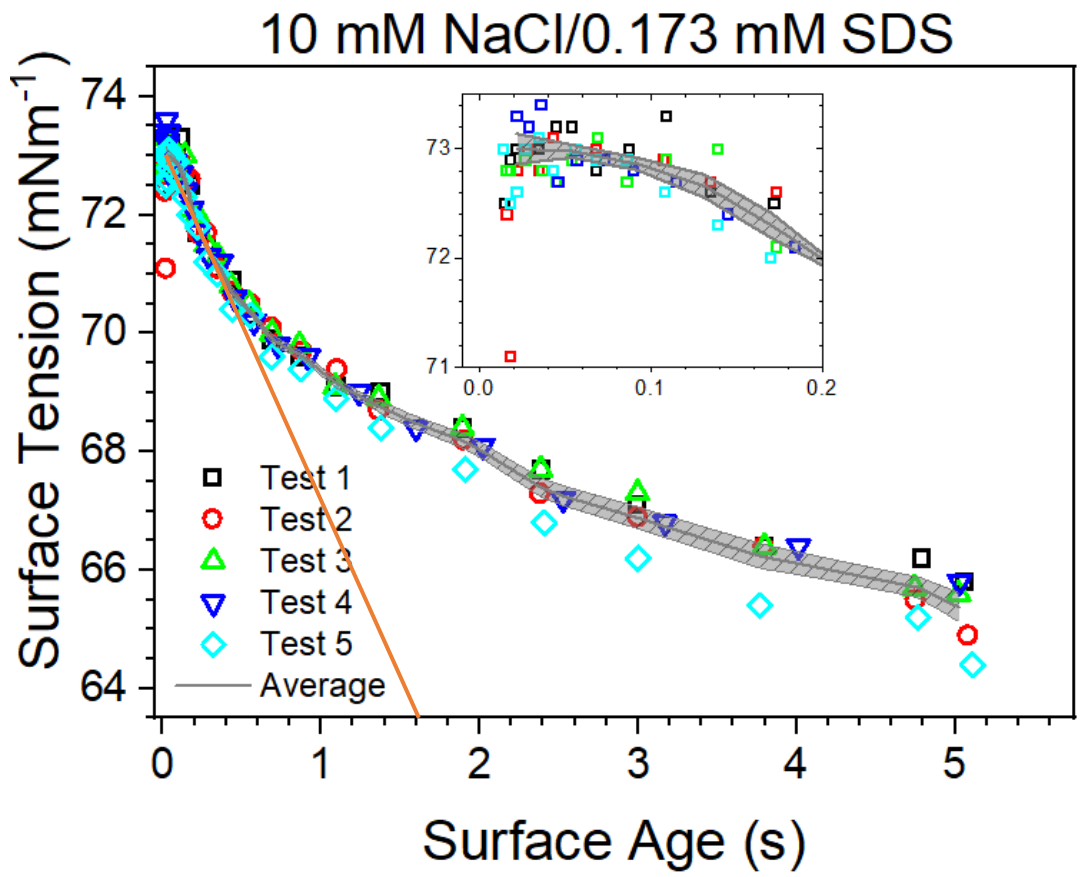


Διάγραμμα 3: Προσδιορισμός της CMC από το διάγραμμα επιφανειακής τάσης – συγκέντρωσης SDS.

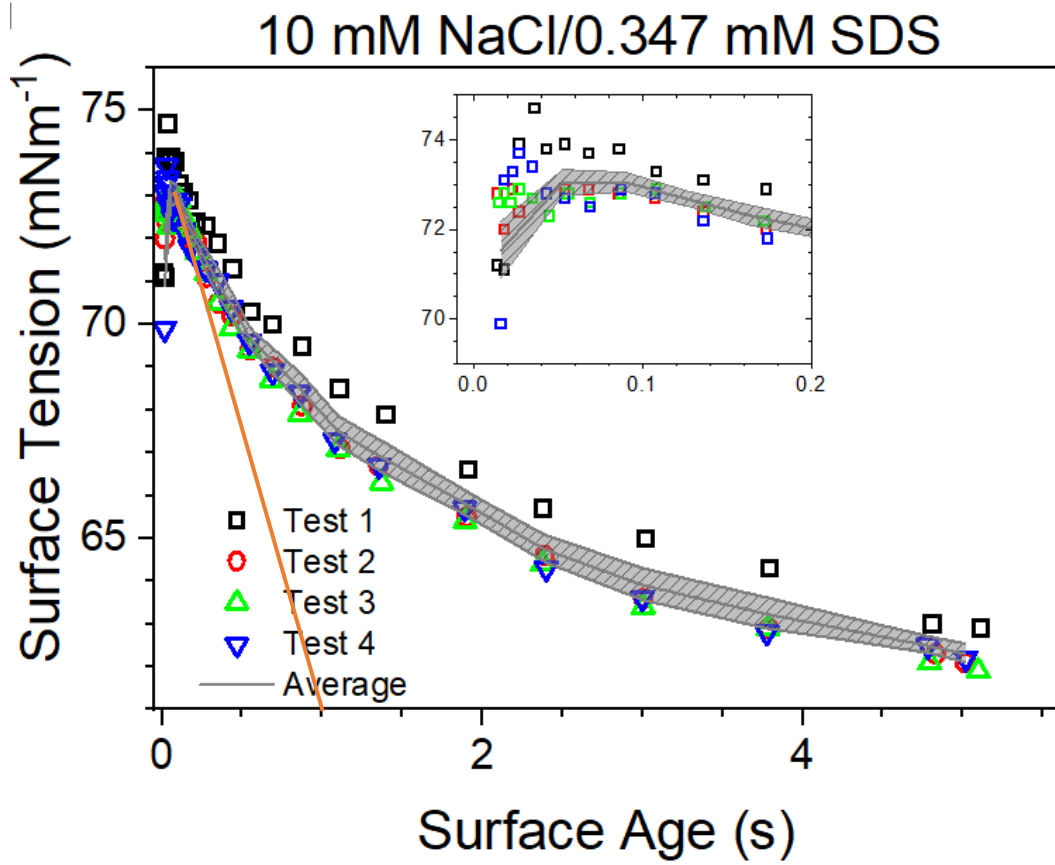
Παρατηρούμε, επίσης, ότι η CMC που προσδιορίζεται από το διάγραμμα επιφανειακής τάσης – συγκέντρωσης SDS, είναι περίπου 2,43mM, τιμή χαμηλότερη από την αναμενόμενη 5Mm που εξάγεται στο άρθρο των Alissa J. Prosser, Elias I. Franses. Επίσης, οι τιμές επιφανειακής τάσης για τις μεγαλύτερες συγκεντρώσεις φαίνεται να αυξάνονται, γεγονός που πιθανόν υπονοεί ότι απαιτείται μεγαλύτερος χρόνος γήρανσης για αποκατάσταση πλήρους ισορροπίας.

## **4.2 Διαγράμματα Επιφανειακής τάσης – Χρόνου γήρανσης φυσαλίδας**

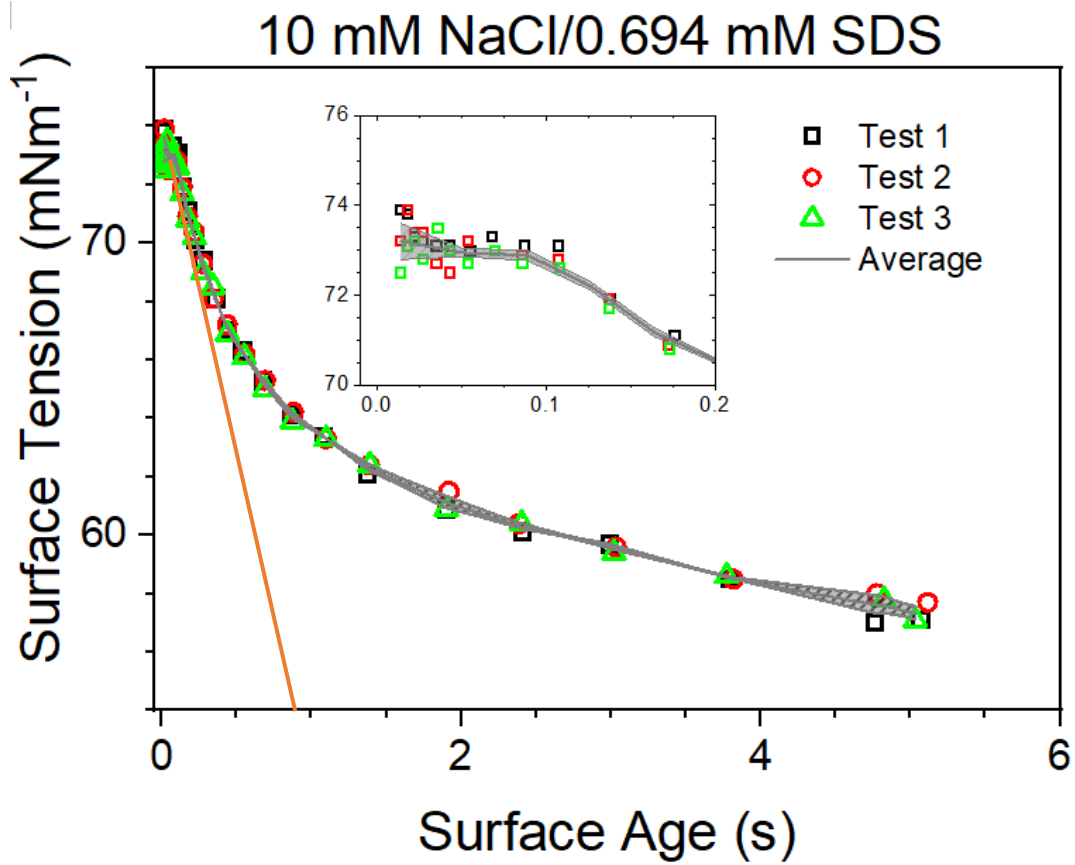
Παρατίθενται παρακάτω τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις πειραματικές μετρήσεις. Στο κάθε διάγραμμα φαίνονται οι καμπύλες για όλες τις διαφορετικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν για κάθε συγκέντρωση SDS. Με γκρι χρώμα απεικονίζεται η μέση τιμή των καμπύλων, ώστε να είναι εμφανής η ακρίβεια των μετρήσεων. Η ευθεία γραμμή παριστάνει την αρχική κλίση (ή ρυθμό μείωσης της επιφανειακής τάσης). Για πολύ μικρές τιμές χρόνου γήρανσης φυσαλίδας (0s – 0,2s) απεικονίζονται επιπλέον μεγεθυμένα τα ίδια διαγράμματα στο ίδιο πλαίσιο, προς καλύτερη ευκρίνεια. Για τα διαγράμματα αυτά χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Origin.



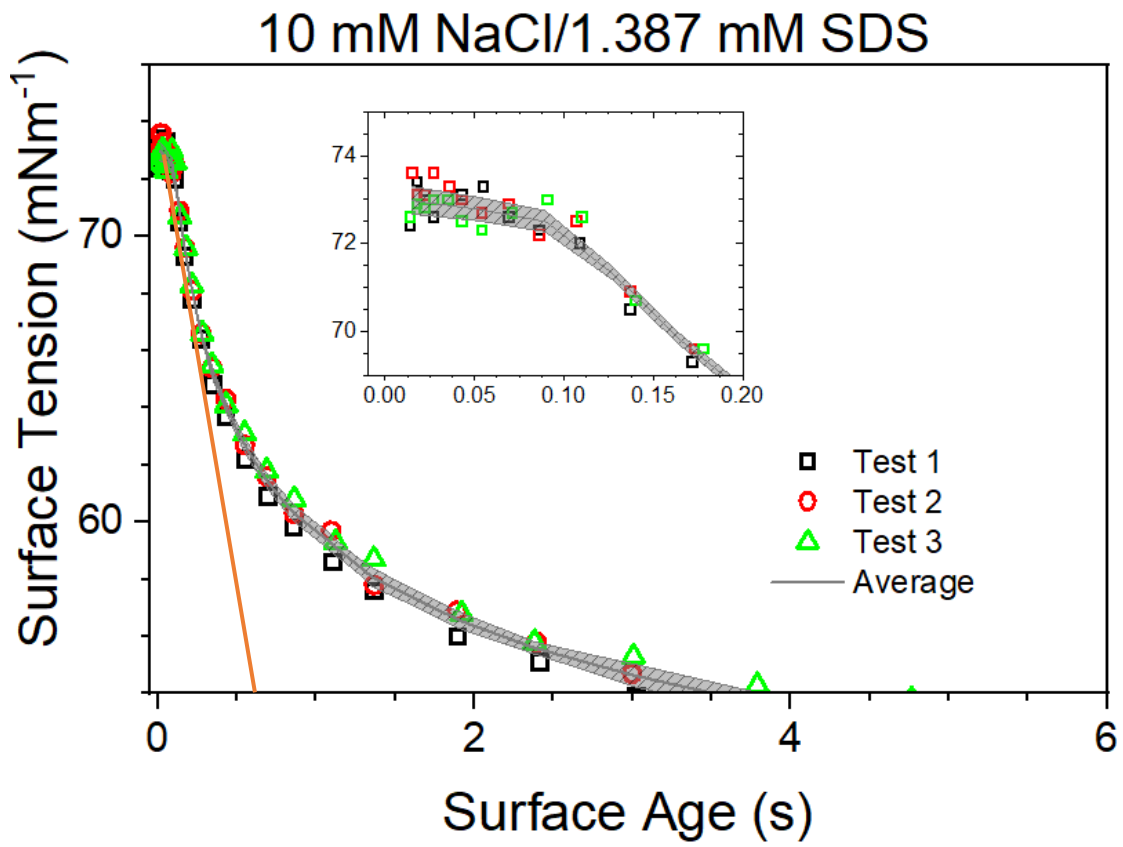
Διάγραμμα 4: Επιφανειακής τάσης - χρόνου γήρανσης, για διάλυμα απιονισμένου νερού, 10mM NaCl και 0,005g SDS/100ml.



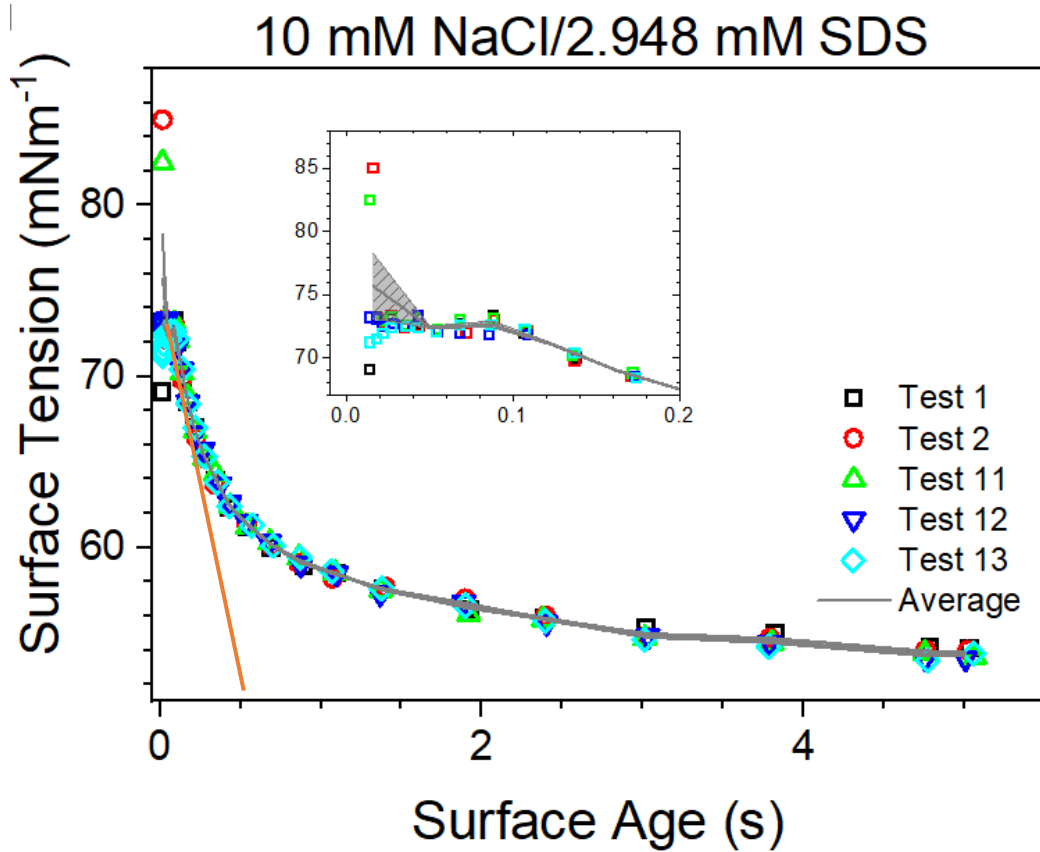
Διάγραμμα 5: Επιφανειακής τάσης - χρόνου γήρανσης, για διάλυμα απιονισμένου νερού, 10mM NaCl και 0,01g SDS/100ml



Διάγραμμα 6: Επιφανειακής τάσης - χρόνου γήρανσης, για διάλυμα απιονισμένου νερού, 10mM NaCl και 0,02g SDS/100ml.

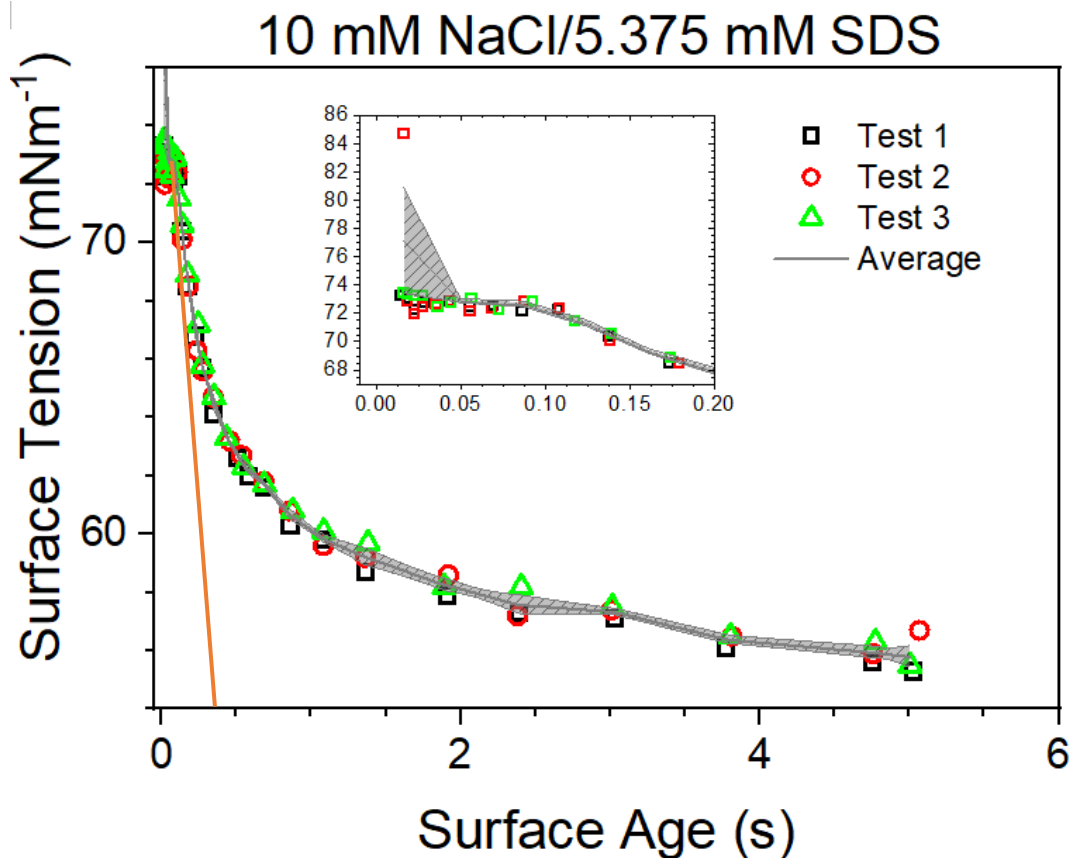


Διάγραμμα 7: Επιφανειακής τάσης - χρόνου γήρανσης, για διάλυμα απιονισμένου νερού, 10mM NaCl και 0,04g SDS/100ml.



Διάγραμμα 8: Επιφανειακής τάσης - χρόνου γήρανσης, για διάλυμα απιονισμένου νερού, 10mM NaCl και 0,085g SDS/100ml.

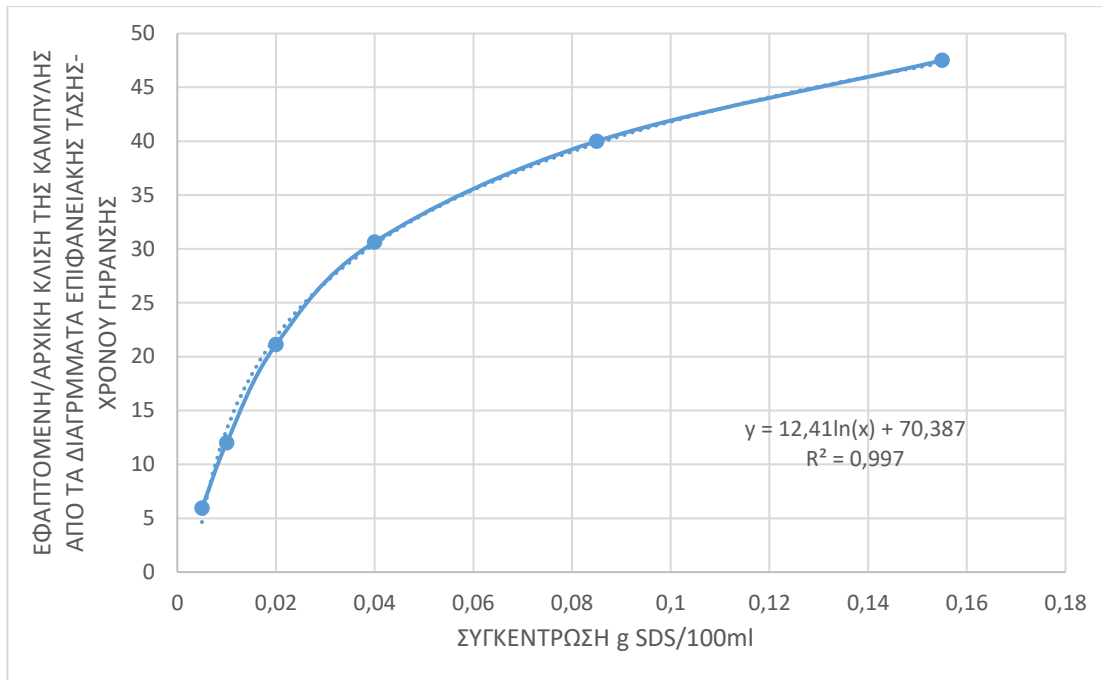




Διάγραμμα 9: Επιφανειακής τάσης - χρόνου γήρανσης, για διάλυμα απιονισμένου νερού, 10mM NaCl και 0,155g SDS/100ml.

Οι προκαταρκτικές παρατηρήσεις από τις δυναμικές μετρήσεις είναι οι εξής:

- Σε κάθε περιεκτικότητα SDS παρατηρείται ένα αρχικό χρονικό διάστημα  $\sim 0,1$  s όπου η επιφανειακή τάση παραμένει σταθερή. Η συμπεριφορά αυτή μπορεί να ερμηνευθεί αν υποθεθεί ότι τα διαλυμένα μόρια επιφανειοδραστικού δεν προλαβαίνουν να διαχυθούν ως την διεπιφάνεια ώστε να μειώσουν την επιφανειακή τάση. Με δεδομένο ότι το χρονικό διάστημα «αδράνειας» είναι ανεξάρτητο της συγκέντρωσης SDS, είναι πιθανόν να αντιστοιχεί σε κινητική αντίσταση, δηλαδή στην διαδικασία πρόσδεσης των μορίων στη διεπιφάνεια.
- Η αρχική κλίση της καμπύλης μείωσης της δυναμικής επιφανειακής τάσης αυξάνεται με τη συγκέντρωση επιφανειοδραστικού σύμφωνα με το Διάγραμμα 10. Είναι ενδιαφέρον ότι τα δεδομένα αυτά συσχετίζονται πολύ ικανοποιητικά με εξίσωση της μορφής  $\kappa = 12,4 \cdot \ln(c) + 70,4$  όπου  $c$  είναι η συγκέντρωση SDS σε mM. Η συσχέτιση αυτή είναι προς το παρόν καθαρά εμπειρική, αλλά αξίζει να διερευνηθεί περαιτέρω.



Διάγραμμα 10: Απεικόνιση της μεταβολής της αρχικής κλίσης της καμπύλης μείωσης της δυναμικής επιφανειακής τάσης με τη μεταβολή της συγκέντρωσης του επιφανειοδραστικού SDS στο υδατικό διάλυμα και σύγκριση με τη λογαριθμική συνάρτηση  $y=12,41\ln(x)+70,387$  (με διακεκομμένη γραμμή).

## 5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Σε αυτήν την διπλωματική εργασία μελετήθηκε η εξάρτηση της επιφανειακής τάσης με την συγκέντρωση επιφανειοδραστικού SDS. Συγκεκριμένα, είναι ξεκάθαρο πως η αύξηση της συγκέντρωσης του SDS στο διάλυμα επιφέρει μείωση της επιφανειακής τάσης ισορροπίας έως ότου η συγκέντρωση του SDS φτάσει τη τιμή της κρίσιμης συγκέντρωσης μικκυλίων. Αυτό φαίνεται από το Διάγραμμα 1. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα με αυτά των Prosser και Franses, παρατηρούμε ότι οι μετρήσεις μας εξάγουν τιμή της CMC (2,43mM) χαμηλότερη από την αναμενόμενη (5mM).

Επίσης, διαπιστώνουμε, από όλα τα διαγράμματα επιφανειακής τάσης – χρόνου γήρανσης φυσαλίδας, ότι υπάρχει δυναμική εξάρτηση μεταξύ αυτών. Για πολύ μικρούς χρόνους έκθεσης της φυσαλίδας στο διάλυμα, η τιμή της επιφανειακής τάσης παραμένει πρακτικά σταθερή, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζει απότομη πτώση. Η συμπεριφορά αυτή, υποδηλώνει τη σημασία του χρονικού διαστήματος που χρειάζεται για τη διάχυση και τη προσρόφηση των μορίων επιφανειοδραστικού από τη κύρια μάζα του διαλύματος στη διεπιφάνεια της φυσαλίδας.

Η προσθήκη του NaCl στο διάλυμα μας, επιδρά στη τιμή της επιφανειακής τάσης και συγκεκριμένα, όσο αυξάνεται η συγκέντρωση του NaCl, τόσο μειώνεται η επιφανειακή τάση. Αυτό το κατανοούμε από τα αποτελέσματα των Prosser και Franses για διαφορετικές συγκεντρώσεις NaCl. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η ανιονική φύση του NaCl η οποία μειώνει τις ηλεκτροστατικές δυνάμεις μεταξύ των κεφαλών των μορίων SDS. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, τη μείωση των αποστάσεων μεταξύ των μορίων επιφανειοδραστικού και επομένως μεγαλύτερο αριθμό μορίων που προσροφούνται στη διεπιφάνεια και προκαλούν τη περαιτέρω μείωση της επιφανειακής τάσης.

Μερικά από τα ερωτήματα που έχουν μείνει αναπάντητα και θα μπορούσαν να αποτελέσουν αντικείμενο για περαιτέρω έρευνα είναι ο προσδιορισμός της επιφανειακής τάσης ισορροπίας, λαμβάνοντας μεγάλους χρόνους γήρανσης φυσαλίδας, ώστε να διαπιστώσουμε ότι η επιφανειακή τάση μειώνεται με την αύξηση της συγκέντρωσης SDS μέχρι τη κρίσιμη συγκέντρωση μικκυλίων καθώς και μετρήσεις με άλλες συγκεντρώσεις NaCl ώστε να καταγραφεί η ακριβής επιρροή του άλατος στο διάλυμα.

## 6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] N Natalie, MA Rogers, 2019. Surfactants, *Encyclopedia of Food Chemistry*, **1**, 276-282
- [2] AJ Prosser, El Franses, 2001. Adsorption and surface tension of ionic surfactants at the air–water interface: review and evaluation of equilibrium models, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, **178**, 1-40.
- [3] A Hashidzume., A Harada, 2015. Micelles and Vesicles, *Encyclopedia of Polymeric Nanomaterials*, 1238–1241.
- [4] [https://en.wikipedia.org/wiki/Sodium\\_dodecyl\\_sulfate](https://en.wikipedia.org/wiki/Sodium_dodecyl_sulfate)
- [5] <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/micelle>
- [6] <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/surface-excess-concentration>
- [7] <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/surfactant>
- [8] <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/tensiometer>
- [9] <https://www.mpikg.mpg.de/4862784/BPA-1P-Info.pdf>
- [10] GL McIntire, JG Dorsey, 1990. Micelles in Analytical Chemistry. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, **21**(4), 257-278.
- [11] FM Menger, 1979. The structure of micelles. *Accounts of Chemical Research*, **12**(4), 111-117.
- [12] Y Moroi, 1992. *Micelles: Theoretical and Applied Aspects*, 1-3.
- [13] KJ Mysels, 1986. Improvements in the maximum-bubble-pressure method of measuring surface tension, *Langmuir*, **2**(4), 428–432.
- [14] KJ Mysels, 1990. The maximum bubble pressure method of measuring surface tension, revisited, *Colloids and Surfaces*, **43**(2), 241–262.
- [15] M Dole, 1951. Surface Tension Measurements, *Physical Methods in Chemical Analysis*, 306-321.
- [16] D Myers, 2020. *Surfactant Science and Technology*, **1**, 1-20.
- [17] <https://www.kruss-scientific.com/en/know-how/glossary/critical-micelle-concentration-cmc-and-surfactant-concentration>
- [18] NC Christov, KD Danov, PA Kralchevsky, KP Ananthapadmanabhan, A Lips, 2006. Maximum Bubble Pressure Method: Universal Surface Age and Transport Mechanisms in Surfactant Solutions. *Langmuir*, **22**, 7528-7542.
- [19] AC Mitropoulos, 2008. What is a surface excess?, *Journal of Engineering Science and Technology Review*, **1**, 1-3
- [20] S Liodakis, K Kordatos, A Μανροπουλος, 2015. ΔΙΑΜΟΡΙΑΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ, *Τράπεζα θεμάτων στη γενική ανόργανη χημεία [Undergraduate textbook]*, **10**, 228-238.
- [21] N Flytzanis, 2015. Φυσικές ιδιότητες των ρευστών, *Εισαγωγή στη μηχανική των ρευστών [Undergraduate textbook]*, **1**, 42-47.
- [22] DH Young, 1994. *Πανεπιστημιακή Φυσική*, **14**, 389-393.

## 7 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

<b>10mM-0.005g SDS/100ml-Test 1</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	4300	15	72,5	23,3
2	26000	18	72,9	23,2
3	47000	22	73	23,2
4	60000	27	72,9	23,2
5	68800	35	73	23,2
6	76600	45	73,2	23,2
7	84100	54	73,2	23,2
8	90400	68	72,8	23,3
9	96400	87	73	23,2
10	102400	109	73,3	23,2
11	108500	135	72,6	23,2
12	115900	172	72,5	23,2
13	123200	217	71,7	23,2
14	132000	271	71,5	23,2
15	140400	349	71,1	23,2
16	150600	439	70,9	23,2
17	162400	546	70,3	23,2
18	177000	685	69,9	23,2
19	193100	867	69,6	23,3
20	210700	1093	69,1	23,2
21	232900	1373	69	23,2
22	288300	1893	68,4	23,2
23	334900	2387	67,7	23,2
24	381700	2995	67,1	23,3
25	433100	3798	66,4	23,2
26	489000	4787	66,2	23,2
27	505100	5061	65,8	23,3
<b>10mM-0.005g SDS/100ml-Test 2</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	4600	16	72,4	23,4
2	10600	18	71,1	23,4
3	30600	22	72,8	23,3
4	46600	28	73	23,4

5	57000	35	72,8	23,4
6	65300	43	73,1	23,4
7	71900	57	72,9	23,3
8	77900	68	73	23,4
9	84300	86	72,9	23,3
10	89800	107	72,9	23,4
11	95600	135	72,7	23,4
12	102900	173	72,6	23,4
13	110500	218	71,7	23,4
14	119300	275	71,7	23,4
15	128800	345	71,1	23,4
16	139700	437	70,7	23,4
17	153000	550	70,5	23,3
18	167200	685	70,1	23,4
19	184900	877	69,7	23,3
20	204700	1098	69,4	23,4
21	228800	1361	68,7	23,4
22	295200	1897	68,2	23,4
23	345700	2378	67,3	23,3
24	400600	2996	66,9	23,3
25	459500	3790	66,4	23,3
26	528900	4748	65,5	23,3
27	548900	5081	64,9	23,3
<b>10mM-0.005g SDS/100ml-Test 3</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	12300	16	72,8	23,5
2	13000	18	72,8	23,5
3	29900	22	73,3	23,5
4	45100	27	72,9	23,5
5	55600	37	72,8	23,5
6	63300	45	72,7	23,5
7	69600	54	72,9	23,5
8	76400	69	73,1	23,5
9	82700	86	72,7	23,5
10	88700	109	72,9	23,5
11	95400	139	73	23,5
12	102700	173	72,1	23,5
13	111200	218	72	23,5
14	120800	277	71,5	23,5
15	131200	348	71,3	23,5
16	141100	431	70,8	23,5

17	155000	542	70,5	23,6
18	170600	689	70	23,5
19	189100	863	69,8	23,5
20	213100	1089	69,1	23,5
21	240100	1362	68,9	23,5
22	324200	1891	68,4	23,5
23	389600	2386	67,7	23,5
24	461200	2997	67,3	23,5
25	544400	3799	66,4	23,5
26	634900	4746	65,7	23,5
27	659600	5023	65,6	23,5
<b>10mM-0.005g SDS/100ml-Test 4</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	4400	22	73,3	23,5
2	11000	23	73,6	23,5
3	33900	29	73,2	23,5
4	43900	36	73,4	23,5
5	52600	46	72,7	23,5
6	57600	57	72,9	23,5
7	63500	73	72,9	23,5
8	70100	90	72,8	23,5
9	77400	115	72,7	23,5
10	83600	145	72,4	23,5
11	92200	184	72,1	23,6
12	99500	229	71,7	23,6
13	109000	291	71,3	23,6
14	118400	368	71,2	23,6
15	131100	455	70,6	23,6
16	145500	576	70,2	23,5
17	162100	728	69,8	23,6
18	183300	918	69,6	23,6
19	206700	1239	69	23,6
20	290100	1598	68,4	23,5
21	356800	2020	68,1	23,5
22	424000	2528	67,2	23,6
23	510900	3171	66,8	23,6
24	617000	4013	66,4	23,6
25	723000	5031	65,8	23,6

<b>10mM-0.005g SDS/100ml-Test 5</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	5400	14	73	21,2
2	33800	18	72,5	21,2
3	47900	22	72,6	21,2
4	56800	27	73	21,2
5	63800	35	73,1	21,2
6	69600	43	72,8	21,1
7	75400	56	73	21,1
8	80500	68	72,9	21,1
9	86000	86	72,9	21,1
10	91100	108	72,6	21,1
11	96500	139	72,3	21,1
12	102300	170	72	21,2
13	109500	220	71,8	21,2
14	116900	279	71,2	21,2
15	125200	345	71	21,2
16	134300	440	70,4	21,2
17	144100	554	70,3	21,2
18	155700	691	69,6	21,2
19	170100	873	69,4	21,1
20	185800	1094	68,9	21,1
21	204200	1380	68,4	21,2
22	251700	1910	67,7	21,2
23	291500	2409	66,8	21,1
24	327400	2999	66,2	21,2
25	372200	3768	65,4	21,3
26	420000	4769	65,2	21,2
27	435100	5112	64,4	21,2
<b>10mM-0.01g SDS/100ml-Test 1</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	12500	14	71,2	21,8
2	27800	18	71,1	21,8
3	34900	22	72,6	21,8
4	40500	27	73,9	21,8



5	46700	36	74,7	21,8
6	50600	43	73,8	21,8
7	55300	54	73,9	21,8
8	59800	68	73,7	21,7
9	64300	86	73,8	21,8
10	68700	108	73,3	21,9
11	73700	136	73,1	21,8
12	79600	173	72,9	21,7
13	85600	218	72,4	21,8
14	92500	273	72,3	21,8
15	100800	346	71,9	21,8
16	110600	441	71,3	21,8
17	120700	552	70,3	21,8
18	132300	688	70	21,8
19	146500	875	69,5	21,8
20	162400	1107	68,5	21,8
21	182200	1398	67,9	21,8
22	231600	1912	66,6	21,7
23	266900	2378	65,7	21,8
24	311100	3020	65	21,8
25	356600	3792	64,3	21,8
26	409100	4808	63	21,8
27	424400	5111	62,9	21,9
<b>10mM-0.01g SDS/100ml-Test 2</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	6200	14	72,8	21,9
2	30300	18	72	21,9
3	43300	23	72,9	21,8
4	50900	27	72,4	21,9
5	57900	35	72,7	21,9
6	62800	43	72,8	21,9
7	68000	54	72,9	21,9
8	72900	68	72,9	21,9
9	78000	86	72,8	21,9
10	83500	107	72,7	21,9
11	89100	136	72,4	21,9
12	95200	173	72	21,8
13	102400	218	71,9	21,9
14	110000	278	71,1	21,9
15	118600	352	70,5	21,9

16	128100	437	70,2	21,8
17	139600	549	69,4	21,8
18	153300	693	69	21,9
19	170300	876	68,1	21,9
20	189300	1111	67,1	21,9
21	209200	1352	66,7	21,9
22	271700	1901	65,5	21,9
23	318100	2389	64,6	21,9
24	371100	3004	63,6	21,9
25	426700	3788	62,9	21,9
26	488300	4832	62,3	21,9
27	498400	5015	62,1	21,9
<b>10mM-0.01g SDS/100ml-Test 3</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	3700	15	72,6	21,9
2	21600	18	72,8	21,8
3	41200	22	72,6	21,9
4	51500	27	72,9	22
5	58900	35	72,7	22
6	64900	45	72,3	22
7	70000	56	72,8	22
8	75400	69	72,6	22
9	80500	87	72,8	22
10	86500	108	72,9	21,9
11	92700	137	72,5	21,9
12	99500	172	72,2	21,9
13	106100	217	71,7	21,9
14	113900	275	71,2	21,9
15	124100	349	70,5	21,9
16	134100	431	69,9	21,9
17	146900	547	69,4	21,9
18	159400	683	68,7	21,9
19	175300	860	67,9	21,9
20	194500	1102	67,1	21,9
21	218300	1371	66,3	22
22	284800	1893	65,4	21,9
23	340100	2377	64,4	21,9
24	392700	3004	63,4	22
25	462000	3783	62,9	22
26	536800	4794	62,1	22

27	557000	5096	61,9	22
<b>10mM-0.01g SDS/100ml-Test 4</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	3700	16	69,9	22
2	21500	18	73,1	22
3	36200	23	73,3	22
4	43900	27	73,7	22
5	51000	35	73,4	22
6	56000	43	72,8	22
7	61000	54	72,7	22
8	66400	69	72,5	21,9
9	71500	87	72,9	22
10	76500	107	72,8	22
11	82400	136	72,2	21,9
12	88100	174	71,8	22
13	93900	215	71,6	22
14	101900	274	71,3	21,9
15	111100	347	71	22
16	121300	432	70,4	22
17	133900	547	69,6	22
18	148700	691	68,9	22
19	165300	859	68,4	22
20	184800	1078	67,3	22
21	208100	1356	66,7	22
22	279500	1889	65,7	22,1
23	345700	2400	64,3	22
24	401400	3000	63,6	22,1
25	470700	3776	62,8	22,1
26	548600	4781	62,5	22,1
27	568600	5018	62,2	22,1
<b>10mM-0.02g SDS/100ml-Test 1</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	3800	14	73,9	22,1
2	22900	18	73,8	22,1
3	37400	22	73,3	22,1
4	48400	27	73,2	22,1
5	55700	35	73,1	22,1
6	60900	43	73,1	22,1

7	65800	55	73	22
8	71100	68	73,3	22,1
9	75900	87	73,1	22,1
10	81800	107	73,1	22,2
11	88100	138	71,9	22,1
12	93900	176	71,1	22,1
13	103100	223	70,1	22,1
14	110400	276	69,4	22,1
15	121700	362	68,1	22,1
16	133800	442	67	22,1
17	145700	539	66,3	22,1
18	159700	678	65,3	22,1
19	175800	864	64,1	22,1
20	195600	1079	63,4	22,2
21	219300	1373	62,1	22,2
22	282300	1902	60,9	22,2
23	331800	2408	60,1	22,2
24	385300	2995	59,7	22,2
25	452000	3795	58,5	22,2
26	521900	4763	57	22,2
27	538200	5068	57,1	22,2
<b>10mM-0.02g SDS/100ml-Test 2</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	20100	14	73,2	20,9
2	38200	18	73,9	20,8
3	46600	22	73,4	20,8
4	53400	27	73,4	20,8
5	59600	35	72,7	20,8
6	65000	43	72,5	20,8
7	70200	54	73,2	20,8
8	75400	70	73	20,8
9	80400	86	72,9	20,8
10	85800	107	72,8	20,8
11	91200	137	71,9	20,8
12	96900	172	70,9	20,8
13	102900	216	70,4	20,8
14	110400	273	69,3	20,8
15	117800	344	68,1	20,8
16	126700	437	67,2	20,7
17	137600	553	66,2	20,8
18	149100	692	65,3	20,7

19	161600	880	64,2	20,8
20	178100	1097	63,3	20,8
21	196200	1387	62,4	20,7
22	236200	1919	61,5	20,8
23	271700	2386	60,4	20,8
24	309900	3035	59,6	20,8
25	351100	3818	58,5	20,8
26	388600	4775	58	20,8
27	399300	5115	57,7	20,8
<b>10mM-0.02g SDS/100ml-Test 3</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	13100	14	72,5	20,8
2	33300	18	73,1	20,9
3	44000	22	73,2	20,8
4	52100	27	72,8	20,9
5	59000	36	73,5	20,9
6	64000	43	73	20,9
7	69400	54	72,7	20,9
8	74900	70	73	20,9
9	80200	86	72,7	20,9
10	85600	108	72,6	20,9
11	91800	137	71,7	20,9
12	97800	173	70,8	20,9
13	104900	219	70,2	20,9
14	112400	273	69	20,9
15	120900	345	68,5	20,9
16	131800	439	66,9	20,9
17	142800	552	66,1	20,9
18	156500	690	65	20,9
19	172400	872	63,9	20,9
20	190000	1097	63,3	20,9
21	212200	1390	62,4	20,9
22	261400	1900	60,9	20,9
23	306300	2404	60,4	20,9
24	350800	3021	59,4	20,9
25	395700	3773	58,6	20,8
26	442500	4823	57,8	20,9
27	453400	5033	57,1	21

<b>10mM-0.04g SDS/100ml-Test 1</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	5400	14	72,4	21,1
2	30800	18	73,4	21,1
3	44300	22	73	21,1
4	51100	27	72,6	21
5	57700	35	73	21,1
6	63600	43	73,1	21,1
7	69800	55	73,3	21,1
8	75600	69	72,6	21,1
9	81200	86	72,3	21,1
10	86900	109	72	21,1
11	93600	137	70,5	21,1
12	100100	172	69,3	21,1
13	107400	218	67,8	21,1
14	116100	274	66,4	21,1
15	125300	347	64,8	21,1
16	135200	431	63,7	21
17	147400	553	62,2	21,1
18	163400	697	60,9	21
19	179600	860	59,8	21,1
20	199800	1108	58,6	21
21	221900	1371	57,6	21,1
22	279300	1898	56	21
23	324200	2417	55,1	21
24	374300	3027	53,9	21,1
25	425200	3816	53	21
26	479300	4780	52,4	21,1
27	490600	5041	52,2	21,1
<b>10mM-0.04g SDS/100ml-Test 2</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	4100	15	73,6	21,2
2	25800	18	73,1	21,2
3	43800	22	73,1	21,2
4	55400	27	73,6	21,2
5	64000	36	73,3	21,2

6	70400	43	73	21,2
7	76700	54	72,7	21,1
8	82600	69	72,9	21,1
9	88300	86	72,2	21,1
10	94500	107	72,5	21,1
11	101300	137	70,9	21,1
12	108400	173	69,6	21,1
13	116700	219	68,1	21,1
14	125900	275	66,6	21,1
15	136500	344	65,4	21,1
16	148800	431	64,3	21
17	162900	551	62,7	21,1
18	178900	690	61,6	21,1
19	197700	861	60,3	21,1
20	221300	1096	59,7	21,1
21	247700	1366	57,8	21,1
22	317800	1892	56,9	21,2
23	372200	2393	55,8	21,1
24	431500	2999	54,7	21,2
25	497800	3779	53,7	21,1
26	566500	4836	53,1	21,2
27	583700	5087	52,8	21,2
<b>10mM-0.04g SDS/100ml-Test 3</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	4100	14	72,6	21,3
2	24700	18	72,9	21,3
3	45600	22	72,8	21,3
4	56300	27	73	21,3
5	64700	35	73	21,3
6	71200	43	72,5	21,3
7	77300	54	72,3	21,3
8	84000	71	72,7	21,3
9	89900	91	73	21,4
10	97000	110	72,6	21,3
11	101500	140	70,7	21,3
12	109600	178	69,6	21,3
13	118900	215	68,3	21,3
14	129200	282	66,6	21,3
15	139000	343	65,5	21,3
16	152200	433	64,1	21,3
17	165700	550	63,1	21,3

18	182300	689	61,8	21,3
19	202100	864	60,8	21,3
20	220800	1125	59,3	21,3
21	256000	1366	58,7	21,3
22	321000	1922	56,8	21,3
23	380100	2381	55,8	21,3
24	441500	3006	55,3	21,3
25	519400	3789	54,3	21,3
26	593200	4765	53,8	21,3
27	610100	5034	53,6	21,4
<b>10mM-0.085g SDS/100ml-Test 1</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	3400	14	69,1	21,1
2	22300	18	73,2	21,2
3	34300	22	72,9	21,2
4	42300	27	73,1	21,2
5	49500	35	72,6	21,2
6	55400	43	72,7	21,2
7	60600	55	72,3	21,2
8	65600	68	72,7	21,1
9	71000	88	73,3	21,1
10	76200	107	72	21,2
11	82800	138	70	21,2
12	89000	171	68,5	21,2
13	95900	214	67	21,2
14	104300	272	65,4	21,1
15	114100	346	63,9	21,2
16	124000	432	62,3	21,2
17	136900	545	61,2	21,2
18	155300	689	60	21,2
19	174000	893	58,9	21,2
20	197300	1098	58,5	21,2
21	223800	1392	57,6	21,2
22	293000	1925	56,4	21,2
23	354500	2388	55,9	21,2
24	432200	3020	55,3	21,3
25	514500	3824	55	21,3
26	599000	4787	54,2	21,4



27	620600	5032	54,1	21,4
<b>10mM-0.085g SDS/100ml-Test 2</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	3500	16	85	21,4
2	16300	19	73,1	21,4
3	28800	22	72,7	21,5
4	38400	27	73,3	21,5
5	49900	35	72,4	21,5
6	54200	44	72,5	21,5
7	60600	54	72,1	21,5
8	66000	72	72	21,5
9	70900	89	73	21,5
10	77500	109	72,1	21,5
11	80900	137	69,8	21,5
12	89800	171	68,5	21,5
13	95200	225	66,4	21,5
14	106700	279	65,2	21,5
15	114300	339	63,7	21,5
16	126400	427	62,4	21,5
17	135400	539	61,4	21,5
18	156000	692	60,1	21,5
19	176300	860	59,1	21,5
20	195400	1074	58,2	21,4
21	223400	1398	57,7	21,4
22	291700	1900	57	21,5
23	349100	2397	56	21,5
24	429100	3018	54,8	21,5
25	511300	3792	54,7	21,6
26	609700	4761	54	21,5
27	626200	5023	54	21,5
<b>10mM-0.085g SDS/100ml-Test 11</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	5300	14	82,5	20,9
2	25000	18	73,1	20,9
3	37100	22	72,9	20,9
4	44700	27	73,2	20,9

5	51600	36	72,6	20,8
6	56500	43	73,1	20,8
7	62100	55	72,3	20,9
8	67000	68	73	20,9
9	72500	88	73,1	20,9
10	78200	108	72,1	20,9
11	84600	136	70,2	20,9
12	91000	172	68,8	20,9
13	98600	219	66,8	20,9
14	106800	276	65,2	20,9
15	117200	344	64,3	20,9
16	128300	437	62,4	20,9
17	141900	544	61,2	20,9
18	152000	684	60,3	20,9
19	171300	863	59,4	20,9
20	191900	1088	58,5	21
21	216100	1373	57,5	21
22	283300	1920	56,1	21
23	337900	2382	55,8	21
24	406100	3015	54,7	21,1
25	476000	3805	54,4	21,1
26	548500	4756	53,8	21,1
27	566500	5068	53,6	21,1
<b>10mM-0.085g SDS/100ml-Test 12</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	3600	14	73,2	21,1
2	22800	18	73,1	21,2
3	37400	22	72,5	21,2
4	45800	28	72,7	21,2
5	52200	35	72,5	21,2
6	57600	43	73,3	21,2
7	62500	55	72,1	21,2
8	67900	68	72	21,1
9	73800	86	71,8	21,1
10	79600	109	71,8	21,2
11	85900	137	70,4	21,2
12	93300	173	68,5	21,2
13	100500	218	66,7	21,2
14	108700	269	65,7	21,1
15	114300	372	63,7	21,1

16	130100	433	62,6	21,2
17	142500	537	61,5	21,2
18	158200	678	60,3	21,2
19	179500	875	59	21,2
20	205200	1096	58,5	21,3
21	232700	1369	57,3	21,2
22	305800	1888	56,8	21,2
23	370800	2403	55,6	21,2
24	446000	3035	54,8	21,3
25	524200	3789	54,4	21,3
26	612000	4758	53,5	21,4
27	635600	5009	53,5	21,4
<b>10mM-0.085g SDS/100ml-Test 13</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	3800	14	71,2	21,5
2	17900	18	71,5	21,5
3	39900	22	71,9	21,5
4	48100	27	72,4	21,5
5	54700	36	72,5	21,5
6	59400	43	72,4	21,5
7	65000	54	72,1	21,5
8	70200	68	72,6	21,5
9	75300	87	72,6	21,4
10	81100	107	72,2	21,5
11	87200	137	70,4	21,5
12	94500	174	68,4	21,5
13	102000	219	67	21,5
14	111000	275	65,3	21,5
15	121100	356	63,8	21,5
16	129900	430	62,4	21,5
17	144000	570	61,3	21,5
18	160800	701	60,1	21,5
19	181400	868	59,4	21,6
20	200000	1066	58,6	21,5
21	227400	1377	57,6	21,6
22	295400	1898	56,6	21,5
23	353200	2395	55,7	21,6
24	422200	3010	54,6	21,7
25	496400	3786	54,2	21,7
26	578700	4773	53,4	21,7

27	602500	5060	53,8	21,7
<b>10mM-0.155g SDS/100ml-Test 1</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	3600	14	73,3	21,4
2	23500	18	73,1	21,5
3	37800	22	72,3	21,5
4	46600	28	72,8	21,5
5	52700	35	72,7	21,5
6	58200	43	72,9	21,5
7	64200	55	72,5	21,6
8	69600	69	72,6	21,6
9	74900	86	72,2	21,6
10	80800	107	72,3	21,6
11	87300	137	70,4	21,5
12	94600	173	68,5	21,6
13	101600	221	66,8	21,6
14	110400	273	65,7	21,6
15	121400	347	64,1	21,6
16	130000	508	62,6	21,6
17	142400	580	62	21,6
18	164000	687	61,6	21,6
19	190800	859	60,3	21,6
20	214600	1084	59,8	21,7
21	241500	1365	58,7	21,6
22	314400	1908	57,9	21,6
23	373400	2390	57,3	21,7
24	450100	3031	57,1	21,7
25	527700	3773	56,1	21,7
26	619400	4754	55,6	21,7
27	637100	5024	55,3	21,7
<b>10mM-0.155g SDS/100ml-Test 2</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	3800	16	84,7	22
2	15100	18	72,9	21,8
3	32900	22	72	21,8
4	44100	27	72,5	21,8
5	51600	35	72,7	21,8
6	56400	44	72,9	21,8
7	61600	55	72,2	21,8

8	67100	68	72,4	21,8
9	72700	87	72,9	21,8
10	78000	108	72,4	21,8
11	84100	138	70,1	21,8
12	89700	179	68,5	21,8
13	93800	236	66,3	21,8
14	99900	280	65,6	21,8
15	106300	345	64,7	21,8
16	118800	455	63,2	21,9
17	141700	537	62,7	21,9
18	165600	684	61,8	21,8
19	194100	857	60,8	21,9
20	224000	1082	59,6	21,9
21	261300	1363	59,2	21,9
22	349200	1919	58,6	21,9
23	418500	2380	57,2	21,9
24	505200	3009	57,4	22
25	603000	3813	56,5	22
26	699900	4756	55,9	22,1
27	729300	5067	56,7	21,9
<b>10mM 0.155g SDS/100ml-Test 3</b>				
No.	Time [ms]	Surface Age [ms]	Surface Tension [mN/m]	Temperature [°C]
1	3500	16	73,5	22
2	19000	18	73,4	21,9
3	27100	22	73,3	22
4	35600	27	73,3	22
5	41100	36	72,5	22
6	46600	44	72,8	22
7	51600	56	73,1	22
8	56700	72	72,3	21,9
9	62600	92	72,9	22
10	69300	117	71,5	22
11	76900	139	70,6	22
12	81200	174	68,9	22
13	90300	245	67,2	22
14	101200	273	65,8	22
15	111100	350	64,7	22
16	124200	433	63,3	22
17	138900	550	62,3	22
18	155200	687	61,7	22
19	173800	878	60,8	22
20	196800	1084	60,1	22

21	225500	1381	59,7	22,1
22	298900	1891	58,2	22
23	378700	2406	58,2	22,1
24	464300	3014	57,5	22
25	568700	3803	56,5	22
26	685200	4772	56,3	22,1
27	712900	5006	55,5	22,1