

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ 1714

ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΑΣΗΣ ΔΙΑΣΠΑΣΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΛΑΔΙΩΝ ΜΕ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΣΙΛΙΚΑ

Πτυχιακή εργασία

του φοιτητή

Μπακερτζής Παναγιώτης

Επιβλέπων Καθηγητής : Βασίλειος Χαραλαμπάκος

Αριθμός πτυχιακής : 1714

ΠΑΤΡΑ 2019

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ως υψηλή τάση ορίζεται για το εναλλασσόμενο ρεύμα κάθε τάση η οποία είναι μεγαλύτερη από 1000 Volt , ενώ για το συνεχές ρεύμα κάθε τάση η οποία είναι πάνω από 1500 Volt. Έτσι ο ηλεκτρολογικός εξοπλισμός που προορίζεται να εγκατασταθεί και να λειτουργήσει υπό τάση εναλλασσόμενου-συνεχές ρεύματος υψηλότερη του 1KV-1,5KV χαρακτηρίζεται ως εξοπλισμός Υψηλής Τάσης.

Η μόνωση του εξοπλισμού και των εγκαταστάσεων υψηλής τάσης είναι απαραίτητη προκειμένου να διατηρηθεί η διαφορά δυναμικού των υπό υψηλή τάση αγωγίων μερών. Απόλυτα καθιερωμένη είναι η χρήση μονωτικών ελαίων ως μονωτικό υλικό στον εξοπλισμό υψηλής τάσης με το πιο ενδεικτικό παράδειγμα τη μόνωση των τυλιγμάτων των μετασχηματιστών ισχύος.

Στην παρούσα έρευνα ασχοληθήκαμε με την μελέτη των μονωτικών λαδιών φυτικής προέλευσης και πιο συγκεκριμένα με την διάσπαση της τάσης συνδυάζοντας νανοσωματίδια silica μέσα στο λάδι. Σε θεωρητικό επίπεδο , περιγράφουμε τον ρόλο των μονωτικών λαδιών , τις χρήσεις τους , τις ιδιότητες , και τους παράγοντες που τα επηρεάζουν. Επιπροσθέτως αναφέρουμε για τα νανοέλαια όπου χρησιμοποιούνται σε πειραματικό κυρίως στάδιο την τελευταία δεκαετία , δείχνοντας μάλιστα πολύ καλά στοιχεία καθώς η προσθήκη νανοσωματίδιων στα φυτικά έλαια μετασχηματιστών μπορεί να βελτιώσει τα ηλεκτρικά και θερμικά τους χαρακτηριστικά.

Στο πειραματικό μας μέρος στόχος μας ήταν η διερεύνηση της συμπεριφοράς του φυτικού ελαίου που καταπονείται εντός διακένου σε μια γραμμικά αυξανόμενη AC τάση. Αναζητήσαμε λοιπόν την επίδραση του μονωτικού ελαίου στην τάση διάσπασης. Η έρευνα διεξήχθη στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών υπό την επίβλεψη της καθηγήτριας Ελευθερίας Πυργιώτη , του καθηγητή Βασίλειου Χαραλαμπίκου και την συνεργασία του υποψήφιου διδάκτορα Κώστα Κούτρα. Για τον σκοπό αυτό προμηθευτήκαμε το φυτικό έλαιο Envirotemp® FR3™ από την εταιρία CARGILL , η διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε με την συσκευή BAUR OIL TESTER DTA 822-129-1 του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων. Πραγματοποιήθηκαν πλήθος μετρήσεων με στόχο την εξακρίβωση και εξαγωγή των συμπερασμάτων από την εφαρμογή γραμμικώς αυξανόμενης a.c. τάσης σε έλαια διαφορετικής περιεκτικότητας αναλόγως της ποσότητας των νανοσωματίδιων σιλικόνης που περιείχαν και της ποσότητας του ελαίου, επίσης έγιναν μετρήσεις με δυο περιπτώσεις σε έλαιο με αφύγρανση και χωρίς.

Τέλος πραγματοποιήθηκε η εμφάνιση των αποτελεσμάτων σε πίνακες και περαιτέρω ανάλυση τους με βάση τα διαγράμματα για την διεξαγωγή των συμπερασμάτων. Η στατιστική ανάλυση που χρησιμοποιήσαμε για την καλύτερη αποτύπωση και διεκπεραίωση των αποτελεσμάτων ήταν η ανάλυση κατά Weibull και normal.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΕΛΑΙΑ

1.1 Εισαγωγή.....	5
1.2 Είδη μονωτικών ελαίων.....	6
1.2.1 Ορυκτά Έλαια.....	8
1.2.2 Φυσικοί Εστέρες ή Φυτικά Έλαια.....	13
1.3 Χρήση μονωτικών λαδιών.....	15
1.3.1 Μετασχηματιστές:.....	15
1.3.1.1 Γενικά.....	15
1.3.1.2 Δομή μετασχηματιστή.....	16
1.3.1.3 Μετασχηματιστές ισχύος.....	17
1.3.1.4 Βασικά κατασκευαστικά μέρη ενός - -μετασχηματιστή ισχύος λαδιού.....	18
1.3.1.5 Μονωτικό χαρτί.....	20
1.3.1.6 Χρόνος ζωής μετασχηματιστή.....	20
1.3.2 Καλώδια.....	21
1.3.3 Μονωτήρες διέλευσης.....	23
1.3.4 Πυκνωτές.....	23
1.3.5 Μετασχηματιστές μετρήσεων.....	23
1.3.6 Ελαιδιακόπτες.....	24
1.4 Ιδιότητες μονωτικών λαδιών.....	24
1.4.1 Φυσικές ιδιότητες.....	24
1.4.1.1 Θερμική αγωγιμότητα.....	25
1.4.1.2 Ειδική θερμότητα.....	25
1.4.1.3 Πυκνότητα.....	26
1.4.1.4 Ιξώδες.....	27
1.4.1.5 Σημείο ροής.....	27
1.4.1.6 Συντελεστής θερμικής διαστολής.....	28
1.4.1.7 Χρώμα.....	28
1.4.1.8 Καθαρότητα.....	29
1.4.1.9 Σημεία ανάφλεξης και καύσης.....	29
1.4.1.10 Επιφανειακή τάση.....	30
1.4.2 Χημικές ιδιότητες.....	30
1.4.2.1 Οξείδωση.....	30
1.4.2.2 Οξύτητα.....	31
1.4.2.3 Βαθμός εξουδετέρωσης.....	32
1.4.2.4 Αλκαλικότητα ή βαθμός σαπωνοποίησης.....	35
1.4.2.5 Υγρασία (Περιεκτικότητα σε νερό).....	35
1.4.2.6 Έκλυση και απορρόφηση αερίων.....	37
1.4.3 Ηλεκτρικές ιδιότητες.....	38
1.4.3.1 Ειδική αγωγιμότητα.....	38
1.4.3.2 Συντελεστής απωλειών.....	38
1.4.3.3 Ειδική αντίσταση.....	39
1.4.3.4 Σχετική διηλεκτρική σταθερά.....	39
1.4.3.5 Διηλεκτρική αντοχή.....	39
1.4.4 Μηχανισμοί διάσπασης υγρών διηλεκτρικών.....	42
1.4.4.1 Γενικά.....	42
1.4.4.2 Ηλεκτρονική διάσπαση.....	43
1.4.4.3 Μηχανισμός αιωρούμενων στερεών σωματιδίων.....	43

1.4.4.4 Διάσπαση κοιλότητας.....	45
1.4.4.5 Ηλεκτρομεταφορά και ηλεκτροϋδροδυναμικό πρότυπο διηλεκτρικής διάσπασης.....	45
1.4.4.6 Μια ενδιαφέρουσα περίπτωση με χρήση νανοσωματιδίων.....	46
1.4.5 Γήρανση.....	46
1.4.5.1 Οξείδωση	46
1.4.5.2 Αποσύνθεση των μορίων του ελαίου	46
1.4.6 Retrofilling.....	47

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2:ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΝΑΝΟΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ

2.1 Νανοέλαια	48
2.2 Απόκριση νανοσωματιδίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου	51
2.3 Συμπεριφορά νανοελαίου υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου	52
2.4 Συμπεριφορά νανοελαίου υπό την επίδραση της βαρύτητας	53
2.5 Σύνθεση νανοελαίου με νανοσωματίδια silica (SiO ₂).....	53

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3:ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 Γενικά.....	54
3.2 Χρησιμοποιηθέντα όργανα.....	55
3.3 Μονωτικά έλαια που χρησιμοποιήθηκαν κατά της μετρήσεις.....	59
3.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την έρευνα μας.	61
3.4.1 Διάκενο.....	61
3.4.2 Υγρασία υπό την επίδραση του χρόνου	61
3.4.3 Χρόνος χαλάρωσης ελαίου.....	62
3.4.4 Επίδραση φυσαλίδων.....	62
3.5 Διαδικασία διεξαγωγής του πειράματος.....	63
3.5.1 Μέτρα προστασίας του ελαίου και της διάταξης.....	63
3.5.2 Εκκίνηση της διαδικασίας μετρήσεων –προετοιμασία.....	63
3.6 Αποτελέσματα-Γραφικές.....	71
3.7 Συμπεράσματα-Σχόλια-Παρατηρήσεις.....	82
3.8 Βιβλιογραφία.....	83
3.9 Παράρτημα.....	87

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΕΛΑΙΑ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Γενικώς σε κάθε σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας βλέπουμε ότι υπάρχει η διαδικασία της παραγωγής , μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Διαπιστώνεται όμως ότι τόσο κατά την μεταφορά όσο και κατά τους απαιτούμενους μετασχηματισμούς της τάσης , εμφανίζονται απώλειες ενέργειας .

Οι ενεργειακές αυτές απώλειες ενέργειας εμφανίζονται στο σύστημα υπό την μορφή θερμότητας , που αυξάνουν με την σειρά τους την θερμοκρασία των υπόλοιπων δομικών στοιχείων του συστήματος.

Τα μονωτικά υλικά του συστήματος είναι αυτά που ανέλαβαν τον ρόλο της ψύξης. Αρχικά τα στέρεα μονωτικά υλικά ήταν αυτά που επικράτησαν , όμως στην συνέχεια ξεκίνησαν έρευνες για πιο αποδοτικά μέσα ψύξης. Κυριότερος λόγος ήταν τα πιο πολλά στέρεα μονωτικά υλικά είναι κυρίως οργανικές συνθέσεις με βάση την κυτταρίνη, που έχει μέγιστη οικονομική λειτουργία σε θερμοκρασίες μικρότερες των 100 °C.

Περίπου με αυτόν τον τρόπο ξεκίνησαν οι δοκιμές και η σταδιακή ένταξη των μονωτικών και διηλεκτρικών υγρών ως κύριο ψυκτικό και μονωτικό μέσο. Στην αρχή χρησιμοποιήθηκαν έλαια πετρελαϊκής προέλευσης (ορυκτέλαια) τα οποία κυριάρχησαν στην διεθνή αγορά. Όμως εμφανίστηκαν τοξικά παράγωγα μετά από χρόνια χρήση τους και οι έρευνες αναγκάστηκαν να στραφούν σε συνθετικά και φυσικά έλαια , μη πετρελαϊκής προέλευσης.

Η πρώτη προσπάθεια χρήσης εναλλακτικών λαδιών ήταν τα άφλεκτα έλαια με βάση τα πολυχλωριωμένα διφαινύλια (PCB), όμως σε σύντομο χρονικό διάστημα αποσύρθηκαν λόγω των συνεπειών της βιοσυσσωρευσης. Άλλη μια προσπάθεια για την αντικατάσταση τους έγινε με την χρησιμοποίηση λαδιών με βάση την σιλικόνη αλλά ούτε αυτή δεν είχε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Αργότερα την εμφάνιση τους στην αγορά έκαναν οι συνθετικοί εστέρες όμως η προτίμηση τους περιορίστηκε λόγω του υψηλού κόστους.

Η καλή απόδοση των συνθετικών λαδιών οδήγησε τις έρευνες σε ανεύρεση μονωτικού με παρόμοιες ιδιότητες αλλά χαμηλότερου κόστους και κάπου εκεί ισχυροποιήθηκε η πεποίθηση πως οι φυσικοί εστέρες ή φυτικά λάδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αποδοτικά μονωτικά μέσα .Αν και η χρήση τους αρχικά είχε απορριφθεί , κάποιες αλλαγές στη χημική τους σύσταση κατέστησε τα φυτικά λάδια μια εφικτή και άκρως εφαρμόσιμη λύση.

Ως αποτέλεσμα, οι φυσικοί εστέρες χρησιμοποιούνται τα τελευταία χρόνια με επιτυχία ως διηλεκτρικά μετασχηματιστών στην θέση των συμβατικών ορυκτέλαιων. Η χρήση των φυτικών ελαίων έχει σαν αποτέλεσμα αρκετά πλεονεκτήματα , εκτός των άριστων διηλεκτρικών και μονωτικών ιδιοτήτων που τα λάδια πετρελαϊκής φύσης δεν τα παρείχαν.

Κάποια από αυτά είναι η υψηλή βιοαποικοδομησιμότητα , το πολύ υψηλό σημείο ανάφλεξης , η βελτίωση στην κατάσταση του μονωτικού χαρτιού του μετασχηματιστή έναντι της θερμικής αποσύνθεσης , κ.α. Εν κατακλείδι η χρήση τους προτείνεται ως μία μέθοδος παράτασης της θερμικής ζωής του μετασχηματιστή.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η μελέτη της συμπεριφοράς στην τάση διάσπασης του ελαίου φυτικής προέλευσης της εταιρίας Envirotemp® FR3™ από την εταιρία CARGILL , η διεξαγωγή της πειραματικής διαδικασίας πραγματοποιήθηκε με την συσκευή BAUR OIL

TESTER DTA 822-129-1 του ηλεκτρολογικού εξοπλισμού του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων του Πανεπιστημίου Πατρών. Στόχος της έρευνας είναι να έχουμε αρκετά σετ μετρήσεων της τάσης διάσπασης με την προσθήκη νανοσωματιδίων silica χωρίζοντας το φυτικό έλαιο σε δυο μέρη ,ένα σε έλαιο με αφύγρανση και σε άλλο χωρίς αφύγρανση . Με την στατιστική ανάλυση κατά Weibull και normal των αποτελεσμάτων θα μπορέσουμε να δούμε αν η προσθήκη των συγκεκριμένων νανοσωματιδίων είναι αποτελεσματική και αξιόπιστη λύση.

Στο πρώτο κεφάλαιο παρέχουμε κάποιες πληροφορίες σχετικά με το μονωτικά λάδια γενικότερα. Βλέπουμε σε πόσες κατηγορίες χωρίζονται με βάση την προέλευση τους ,την χρήση τους όπου λειτουργούν ως μονωτικά υλικά εκτός των μετασχηματιστών και σε πυκνωτές ,διακόπτες ισχύος ,καλώδια, μονωτήρες διέλευσης κ.α. Αναφερόμαστε στις ιδιότητες τους φυσικές ,χημικές και ηλεκτρικά χαρακτηριστικά, στους μηχανισμούς διάσπασης και στην γήρανση.

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιέχονται πληροφορίες για τα νανοέλαια και για τα νανοσωματίδια εξηγώντας τι ακριβώς είναι και για ποιο λόγο χρησιμοποιούνται.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναφερόμαστε στην πειραματική μας διαδικασία. Επικεντρωνόμαστε στην διαδικασία που κάναμε στο εργαστήριο για να πάρουμε τις μετρήσεις εξηγώντας βήμα βήμα την διαδικασία παρουσιάζοντας επίσης και φωτογραφικό υλικό από τον εξοπλισμό και τα λαδιά όπου χρησιμοποιήσαμε στην έρευνα.

Στην συνέχεια θα δούμε την στατιστική ανάλυση κατά Weibull και normal όπου παρουσιάζουν ακριβώς με γραφικές παραστάσεις όλες τις μετρήσεις μας.

Επίσης μέρος βγάζουμε τα συμπεράσματα μας για την έρευνα αν δηλαδή το υλικό που χρησιμοποιήσαμε είναι αξιόπιστο για τους μετασχηματιστές η παρουσιάζει ελαττώματα και αν ναι κατά πόσο επηρεάζει τον χρόνο ζωής τους και την απόδοση τους.[1]

1.2 Είδη μονωτικών ελαίων

Υπάρχουν γενικότερα τρία είδη μονωτικών ελαίων (Πίνακας 1):

- (i)Φυτικά έλαια (vegetable oils-φυσικά προϊόντα)
- (ii)Ορυκτά έλαια (mineral oils-προϊόντα πετροχημικής προέλευσης)
- (iii)Συνθετικά υγρά (synthetic liquids)

Πίνακ.1 Είδη Μονωτικών Υγρών

	Category	Type
(i)	Vegetable oils	Castor oil, then soya, rapeseed, ...
(ii)	Mineral oils	Naphthenics
		Paraffinics
		High molecular weight
(iii)	Unsaturated linear synthetic hydrocarbons	Polybutenes
	Synthetic aromatic hydrocarbons	Alkylbenzenes
		Alkylnaphthalenes
		Alkylbiphenyls
	Chlorinated linear hydrocarbons	Perchlorinatedethylene
	Chlorinated aromatic hydrocarbons	Trichlorobenzenes
		Polychlorobiphenyls (PCB)
		Polychlorophenylalkanes
	Chlorofluorinated linear hydrocarbons	Trichlorotrifluoroethane
	Ethyleneic aromatic hydrocarbons	Alkyldiarylethene
		Benzyl neocaprates
	Organic esters	Diethylphalate
		Phosphate esters
		Pentaerythritol esters
Diolyether		
Ether-oxides	Polydimethylsiloxanes (PDMS)	
		Polymethylphenylsiloxanes

(Πίνακας 1): (J. Martinez-Vega, *Dielectric Materials For Electrical Engineers*, WILEY)

Η σειρά με την οποία αναφέρονται σχετίζεται με τη εμφάνιση τους χρονολογικά στις εφαρμογές του ηλεκτρολόγου μηχανικού. Όντως τα φυτικά έλαια ήταν τα πρώτα που χρησιμοποιήθηκαν, μετά αναπτύχθηκαν τα ορυκτά έλαια και τέλος τα συνθετικά έλαια προκειμένου να λυθούν τα μειονεκτήματα των ορυκτών ελαίων σε συγκεκριμένες εφαρμογές. Σήμερα, όπου οι ανησυχίες σχετίζονται με το περιβάλλον, η τάση έχει προσανατολιστεί ξανά προς τα φυτικά έλαια (σόγιας, κράμβης, ηλιόσπορου, σιναπόσπορου, κλπ.). Παρόλο που η χρήση τους είναι απαγορευτική μέχρι στιγμής σε μετασχηματιστές διανομής, πολυάριθμες μελέτες προσπαθούν να επεκτείνουν την εφαρμογή τους σε μετασχηματιστές ισχύος, όπως και η παρούσα διπλωματική. [2]

Ο Πίνακας 2, παρουσιάζει τις βασικές εφαρμογές διάφορων μονωτικών υγρών σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό [3]. Τρία είδη λοιπόν διαχωρίζονται με βάση την εφαρμογή τους στους μετασχηματιστές:

-Ορυκτά έλαια: τα πλέον ευρέως χρησιμοποιούμενα μονωτικά υγρά σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό, λόγω των επιθυμητών διηλεκτρικών ιδιοτήτων τους και της απαγωγής θερμότητας που μπορούν να προσφέρουν, της χημικής συμβατότητας τους με μονώσεις πλούσιες σε κυτταρίνη και του χαμηλού κόστους τους. Οι μετασχηματιστές ισχύος μπορούν να περιέχουν 40-80.000lt λαδιού. Είναι κυρίως λόγω αυτού του τεχνο-οικονομικού λόγου που αυτό το είδος ελαίου χρησιμοποιείται ευρέως σε μετασχηματιστές ισχύος.

-Συνθετικά Έλαια: τα οποία χρησιμοποιούνται μόνο όταν απαιτούνται ειδικές συνθήκες, όπως στη περίπτωση των υψηλών σημείων ανάφλεξης, σε μετασχηματιστές που βρίσκονται σε κατοικημένες περιοχές (διανομή, μεταφορά HE). Αυτά τα συνθετικά έλαια προκύπτουν από διαφορετικές πετροχημικές διεργασίες και υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι τους:

- Εστέρες πενταερυθρίτολης (pentaerythritol ester oils), οι οποίοι συνήθως ονομάζονται συνθετικοί εστέρες ή οργανικοί εστέρες (σε αντίθεση με τους φυσικούς εστέρες ή με τα φυτικά έλαια)
- Έλαια βάσης σιλικόνης (silicone oils)

· Χλωριοποιημένοι υδρογονάνθρακες(chlorinated hydrocarbons), όπως τα PCB τα οποία έχουν απαγορευτεί πλέον.

-Φυτικά Έλαια: Είναι πλέον εμπορικά διαθέσιμα και ευρέως χρησιμοποιούμενα σε εφαρμογές όπου απαιτούνται υψηλά σημεία ανάφλεξης και βιοδιασπώμενα προϊόντα.

Τα συμβατικά μονωτικά έλαια είναι μη βιοδιασπώμενα και συνεπώς μπορούν να μολύνουν το έδαφος και το νερό εάν συμβεί μίας μεγάλης κλίμακας διαρροή τους στο περιβάλλον. Το συμβάν αυτό είναι ικανό να διαταράξει τη χλωρίδα και τη πανίδα σε ένα οικοσύστημα. Επίσης τα ορυκτά έλαια , λόγω της πετροχημικής προέλευσης τους , δεν θα μπορούν να υπάρχουν πάντα διαθέσιμα. Τα κοιτάσματα πετρελαίου κάποια στιγμή στο μέλλον ενδέχεται να εξαντληθούν, καθώς είναι μη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

Οι φυτικοί εστέρες εμφανίζονται να αντικαθιστούν στο μέλλον πλήρως τα ορυκτά έλαια στα συστήματα μόνωσης των μετασχηματιστών , καθώς διαθέτουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των ορυκτών ελαίων.

Μελέτες που έχουν γίνει στο παρελθόν έχουν δείξει ότι ο ρυθμός γήρανσης μίας στερεάς μόνωσης χαρτιού , η οποία έχει εμβαπτιστεί σε φυτικούς εστέρες είναι σημαντικά μικρότερος από εκείνα που έχουν εμβαπτιστεί σε ορυκτά έλαια. [4]

Οι μονώσεις χαρτιού οι οποίες είναι εμβαπτισμένες σε μονωτικό λάδι, χρησιμοποιούνται συχνά μεταξύ των περιελίξεων των μετασχηματιστών , ώστε να συγκρατούν το λάδι και να προσφέρουν μηχανική υποστήριξη. Συνήθως πετυχαίνουν αντοχή στην ηλεκτρική καταπόνηση υπό εναλλασσόμενη τάση και αντέχουν την υποβάθμιση , κατά τη διάρκεια συνδυασμένων ηλεκτρικών, μηχανικών και χημικών καταπονήσεων. Συνεπώς η διηλεκτρική και θερμική σταθερότητα, είναι οι πιο σημαντικές ιδιότητες ενός διηλεκτρικού υλικού το οποίο χρησιμοποιείται σε ένα μετασχηματιστή, και έχουν γίνει αρκετές μελέτες οι οποίες δείχνουν την ηλεκτρική συμπεριφορά των εμβαπτισμένων σε φυτικούς εστέρες μονώσεων χάρτου και τη θερμική σταθερότητα τους στη μακροχρόνια γήρανση.[2]

Πίνακ.2 Εφαρμογές Μονωτικών Υγρών

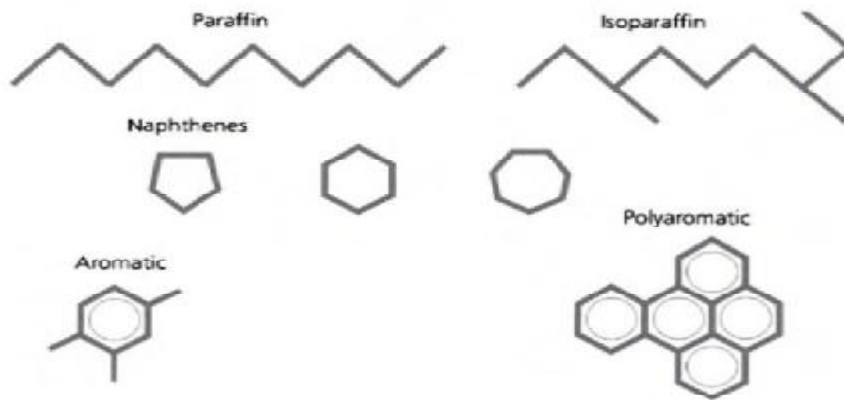
Application	Power trans former and reactor	Distribution trans former	Traction trans former	Instrument trans former
Mineral oil	x	x	x	x
Silicone oil		x	x	
Synthetic ester	o	x	x	
Aromatic hydrocarbons				x
Natural esters	o	x		

(J. Martinez-Vega, Dielectric Materials For Electrical Engineers, WILEY)

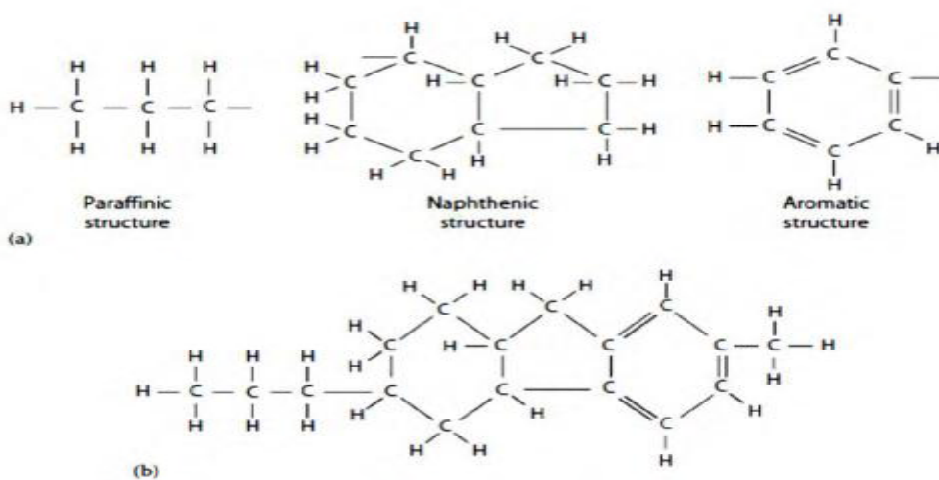
1.2.1 Ορυκτά Έλαια

Χημική σύσταση

Τα ορυκτά έλαια δημιουργούνται από τη διύλιση αργού πετρελαίου και κυρίως αποτελούνται από άτομα άνθρακα και υδρογόνου. Σε κάθε ορυκτό έλαιο, ο άνθρακας βρίσκεται σε (Σχήματα 1.1):



(Σχήματα 1.1) Βασική δομή υδρογονάνθρακα σε ένα ορυκτό έλαιο
(J. Martinez-Vega, *Dielectric Materials For Electrical Engineers*, WILEY)



(α) Μοριακές δομές συστατικών ορυκτών ελαίων
(β) Τυπική δομή ενός μορίου ορυκτού ελαίου
(J. Martinez-Vega, *Dielectric Materials For Electrical Engineers*, WILEY)

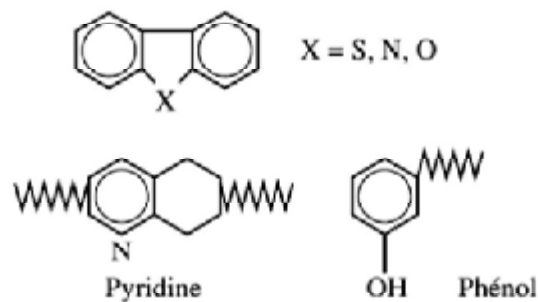
- -Παραφινική δομή (Cp): τα μόρια αυτού του τύπου είναι γνωστά και ως κορεσμένοι υδρογονάνθρακες σε ευθείες αλυσίδες ή αλκάνια, τα οποία μπορούν να είναι γραμμικά (n-αλκάνια) ή με διακλαδώσεις (ίσο-αλκάνια) και των οποίων ο γενικός χημικός τύπος είναι C_nH_{2n+2} . Τα n-αλκάνια είναι επίσης γνωστά ως παραφίνες ή κεριά και έχουν πολύ χαμηλή ρευστότητα σε χαμηλές θερμοκρασίες. [3]
- -Ναφθενική δομή (CN): τα μόρια αυτού του τύπου είναι γνωστά και ως κορεσμένοι κυκλικοί ή κυκλο-αλκανικοί υδρογονάνθρακες. Περιγράφονται αναλυτικότερα σαν κλειστές καρβονικές αλυσίδες, των οποίων ο γενικός χημικός τύπος είναι C_nH_{2n} . Τα κύκλο-αλκάνια (cycloalkanes) εμφανίζουν καλύτερες ιδιότητες σε χαμηλές θερμοκρασίες και έχουν μεγαλύτερη διαλυτότητα από τα n-αλκάνια.
- -Αρωματική δομή (CA): τα μόρια αυτού του τύπου είναι κυκλικά στοιχεία, και είναι επίσης γνωστά και ως ακόρεστοι υδρογονάνθρακες, με γενικό χημικό τύπο C_nH_{2n-6} . Είναι τελείως διαφορετικά από τα παραφινικά και ναφθενικά μόρια, ωστόσο όμως παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στις ιδιότητες ενός ορυκτού ελαίου. Τα βρίσκουμε σε δύο μορφές: τους μονοαρωματικούς και τους πολυαρωματικούς υδρογονάνθρακες, εκ των οποίων πολλοί θεωρούνται και καρκινογόνοι. Αυτά τα αρωματικά στοιχεία επιτρέπουν στα έλαια να έχουν καλή συμπεριφορά όσον αφορά την οξείδωση (παραγωγή φαινολών οι οποίες

εξουδετερώνουν τις ελεύθερες ρίζες) και έχουν επίσης καλές ιδιότητες με τα αέρια(ισχυρή απορροφητικότητα των αερίων-(Self-Healing)) .

Λαμβάνοντας υπόψη την αρχική δομή του αργού πετρελαίου και το ποσοστό του άνθρακα σε κάθε δομή, διαχωρίζουμε δύο κυρίως τύπους ορυκτών ελαίων: τα ναφθενικά έλαια και τα παραφινικά. Μέσω μετρήσεων με υπέρυθη ακτινοβολία το είδος του ελαίου καθορίζεται σύμφωνα με τα παρακάτω ποσοστά συγκεντρώσεων άνθρακα:

- $C_p < 50\%$ έχουμε ναφθενικό έλαιο,
- $C_p \approx 50-56\%$ έχουμε ενδιάμεσο-μεικτό έλαιο,
- $C_p \geq 56\%$ έχουμε έλαιο παραφίνης.

Επίσης τα ορυκτά έλαια περιέχουν ένα πολύ μικρό ποσοστό μορίων υδρογονανθράκων τα οποία στις δομές τους έχουν και άλλα στοιχεία όπως άζωτο, θείο και οξυγόνο. Στις περισσότερες περιπτώσεις αυτά ονομάζονται ετεροάτομα (Σχήμα 1.2) και σχετίζονται με τις αρωματικές ενώσεις , ενώ μπορούμε να τα βρούμε για παράδειγμα στη πυριδίνη (C_5H_5N) ή στις φαινόλες (C_6H_5OH) . Τέλος είναι σημαντικό να προσθέσουμε ότι το θείο παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην διαδικασία της οξείδωσης , διότι εξουδετερώνει τα υπεροξείδια , ενώ οι συνθετικές προσμείξεις οι οποίες μπορούν να προστεθούν (όπως το DBPC) εξουδετερώνουν τις ελεύθερες ρίζες.



(Σχήμα 1.2) Δομές με άλλα άτομα (Heteroatoms) σε ένα ορυκτό έλαιο
(J. Martinez-Vega, Dielectric Materials For Electrical Engineers, WILEY)

Μέθοδοι Παρασκευής

Τα ορυκτά έλαια συντίθενται σύμφωνα με μία διαδικασία η οποία περιλαμβάνει αρχικά διύλιση, ακολουθούμενη από μία διαδικασία αποπαραφινποίησης , έπειτα καθαρισμό των ανεπιθύμητων μορίων με χρήση διαλειμμάτων και τέλος καταλυτική υδρογόνωση .

Η διύλιση είναι η διαδικασία κατά την οποία επιτυγχάνεται ο διαχωρισμός , όπως για παράδειγμα στη συγκεκριμένη περίπτωση ο διαχωρισμός των προϊόντων του αργού πετρελαίου, τα οποία έχουν διαφορετικά σημεία βρασμού, και τα οποία ταιριάζουν για τη χρήση του προϊόντος ως διηλεκτρικό. Η μέγιστη θερμοκρασία διύλισης είναι οι $350^{\circ}C$, πάνω από τους οποίους , εμφανίζεται θερμική αποσύνθεση (καταστροφή) του ελαίου.

Τα ναφθενικά ακατέργαστα κομμάτια της διύλισης , πρακτικά δεν περιέχουν n-αλκάνια και δεν χρειάζονται αποπαραφινποίηση. Όμως, όταν το ίδιο το αργό πετρέλαιο είναι παραφινικής βάσης ,η διαδικασία αποπαραφινποίησης είναι επιβεβλημένη ώστε να αποκτήσουν τις ιδιότητες τους σε αποδεκτή χαμηλή θερμοκρασία. Αυτή η διαδικασία ,

περιλαμβάνει την ανάμιξη του λαδιού με ένα διαλύτη και στη συνέχεια τη ψύξη του διαλύματος. Τα ν-αλκάνια στη συνέχεια κρυσταλλοποιούνται σε μορφή μεγάλων βελόνων και η παραφίνη εξάγεται με διήθηση. Μετά τη διήθηση ο διαλύτης εξάγεται με νέα διύλιση. Η διαδικασία εξαγωγής επιτρέπει την αφαίρεση μη επιθυμητών μορίων, ώστε να βελτιωθεί μία επιθυμητή ιδιότητα, όπως η σταθερότητα στην οξείδωση και την αεριοποίηση. Σε αυτά τα μη επιθυμητά συστατικά, περιλαμβάνονται ακόρεστοι υδρογονάνθρακες, άζωτο και ενώσεις θείου.

Η διαδικασία της υδρογόνωσης απαιτείται για να ολοκληρωθεί η εξαγωγή του διαλύτη. Όντως, η τελευταία αυτή διαδικασία δεν επιτρέπει πλήρως την απομάκρυνση όλων των μη επιθυμητών συστατικών. Συνεπώς τα προϊόντα διύλισης υποβάλλονται σε μία καταλυτική επεξεργασία με άζωτο, σε υψηλές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας (30-100bar, 200-300°C), η οποία μεταμορφώνει τους αρωματικούς υδρογονάνθρακες σε κορεσμένους και μειώνει αισθητά το ποσοστό των καρκινογόνων πολυαρωματικών υδρογονανθράκων (HPA), καθώς και τις ενώσεις θείου και αζώτου σε ουδέτερα χημικά είδη. Πάραυτα, η σημαντική μείωση του ποσοστού των αρωματικών, προκαλεί υποβάθμιση της αντιοξειδωτικής δράσης του προϊόντος και της αεριοποίησης του.[2]

Χαρακτηριστικά

Τα είδη και τα χαρακτηριστικά των ορυκτών ελαίων, τα οποία χρησιμοποιούνται για ηλεκτρικούς σκοπούς ορίζονται στην έκδοση της πιστοποίησης IEC 60296(Πίνακας 3). Επιπλέον υπάρχει οδηγία που περιγράφει τη μέθοδο συντήρησης των ορυκτών ελαίων τα οποία χρησιμοποιούνται σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό στη τυποποίηση IEC 60422. [3]

Πίνακ.3 Προδιαγραφές Ορυκτών Ελαίων-IEC-60296

Property	Test method	Limits	
		Transformer oil	Low temperature switchgear oil
1 – Function			
Viscosity at 40 °C	ISO 3104	Max. 12 mm ² /s	Max. 3.5 mm ² /s
Viscosity at –30 °C ^a	ISO 3104	Max. 1 800 mm ² /s	–
Viscosity at –40 °C ^b	IEC 61868	–	Max. 400 mm ² /s
Pour point ^c	ISO 3016	Max. –40 °C	Max. –60 °C
Water content	IEC 60814	Max. 30 mg/kg ^d / 40 mg/kg ^e	
Breakdown voltage	IEC 60156	Min. 30 kV / 70 kV ^e	
Density at 20 °C	ISO 3675 or ISO 12185	Max. 0,895 g/ml	
DDF at 90°C	IEC 60247 or IEC 61620	Max. 0,005	
2 – Refining/stability			
Appearance	–	Clear, free from sediment and suspended matter	
Acidity	IEC 62021-1	Max. 0,01 mg KOH/g	
Interfacial tension	ISO 6295	No general requirement ^f	
Total sulfur content	BS 2000 Part 373 or ISO 14596	No general requirement	
Corrosive sulfur	DIN 51353	Not corrosive	
Antioxidant additive	IEC 60666	(U) uninhibited oil: not detectable (T) trace inhibited oil: max. 0,08 % (I) inhibited oils: 0,08 – 0,40 %	
2-Furfural content	IEC 61198	Max. 0,1 mg/kg	
3 – Performance			
Oxidation stability ¹	IEC 61125 (method C) Test duration: (U) Uninhibited oil: 164 h (T) Trace inhibited oil: 332 h (I) Inhibited oil: 500 h		
- Total acidity		Max. 1,2 mg KOH/g ⁱ	
- Sludge		Max. 0,8 % ¹	
DDF at 90 °C	IEC 60247	Max. 0,500 ¹	
Gassing	IEC 60626, A	No general requirement	
4 – Health, safety and environment (HSE)			
Flash point	ISO 2719	Min. 135 °C	Min. 100 °C
PCA content	BS 2000 Part 346	max. 3 %	
PCB content	IEC 61619	Not detectable	

^a This is the standard LCSET for an transformer oil (see 5.1) and can be modified depending on the climatic condition of each country. Pour point should be minimum 10 K below LCSET.

^b Standard LCSET for low temperature switch gear oil.

^c For bulk supply.

^d For delivery in drums and IBC.

^e After laboratory treatment (see 6.4).

^f Where it is used as a general requirement, a limit of minimum 40 mN/m is recommended.

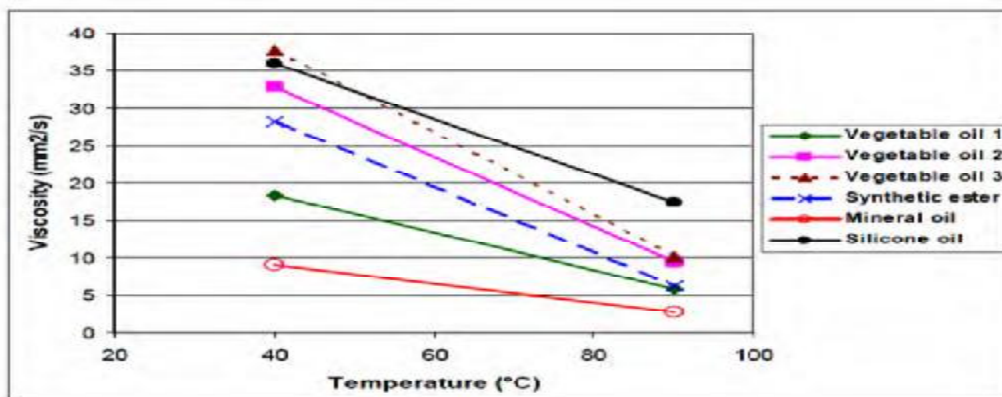
Τα ορυκτά έλαια είναι τα μόνα μονωτικά υγρά τα οποία χρησιμοποιούνται σε μετασχηματιστές ισχύος λόγω των μονωτικών τους ιδιοτήτων (τα οποία δεν έχουν σταματήσει ακόμα να εξελίσσονται από τη πρώτη τους χρήση για αυτό το σκοπό στις αρχές του 20ου αιώνα), της διαθεσιμότητας τους και του χαμηλού κόστους τους. Παρόλο που, σήμερα, οι αποδόσεις τους αγγίζουν ικανοποιητικά επίπεδα, οι κατασκευαστές ηλεκτρικών συσκευών ακόμα στοχεύουν σε βελτιώσεις :

Καλύτερη αντιοξειδωτική δράση, ώστε να αυξηθεί ο χρόνος ζωής των ΜΤ και των μονώσεων κυτταρίνης

Βελτιωμένη διηλεκτρική επίδοση, ώστε να μειωθεί ο όγκος των ΜΤ και να αυξηθεί η ασφάλεια των συστημάτων

Ένα από τα πλεονεκτήματα των ορυκτών ελαίων , και πιο συγκεκριμένα των ναφθενικών , είναι ότι έχουν χαμηλό ιξώδες , συγκριτικά με άλλα μονωτικά έλαια για ΜΤ (Διάγραμμα 1). Αυτό επιτρέπει τη καλή απαγωγή θερμότητας , σωστή ψυχρή εκκίνηση των συστημάτων στα οποία ενσωματώνονται , όπως επίσης και τον εύκολο εμποτισμό των μονώσεων κυτταρίνης με αυτά.

Διάγρ.1 Ιξώδες μονωτικών ελαίων



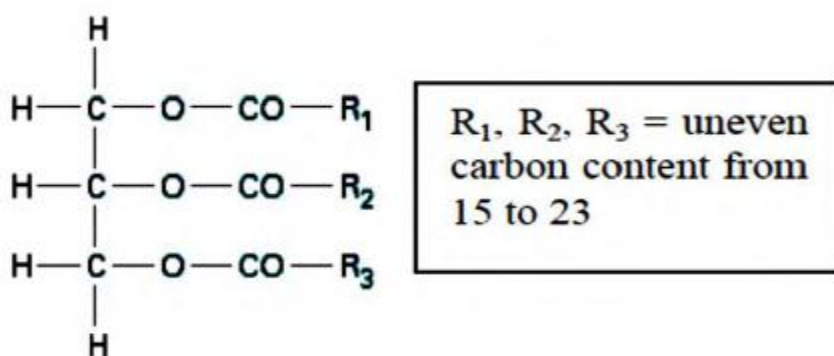
(Alan Darwin, *The use of natural Esters in Transformers*, Matpost '07 conference, Lyon 15-16Nov)

Ένα από τα μειονεκτήματα τους είναι το ότι είναι εύφλεκτα. Αυτά τα λάδια έχουν σχετικά χαμηλά σημεία ανάφλεξης (140-150°C), γεγονός το οποίο τα καθιστά απαγορευτικά για χρήση σε εξοπλισμούς κοντά σε κατοικημένες περιοχές , όπως στη περίπτωση των ΜΤ Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας. Το πρόβλημα αυτό είναι λιγότερο σημαντικό για ογκώδεις ΜΤ Ισχύος οι οποίοι βρίσκονται εγκατεστημένοι σε απομακρυσμένες περιοχές. Πάραυτα, το πρόβλημα παραμένει σημαντικό καθώς και οι τελευταίοι , μπορούν να προκαλέσουν ζημιές σε περίπτωση αστοχίας , στις μονάδες παραγωγής στις οποίες παρέχουν ΗΕ (πχ πυρηνικά εργοστάσια και βιομηχανίες). [3]

Τα βασικά προβλήματα τους , όσον αφορά τη τοξικότητα τους, υφίστανται στο γεγονός ότι αρκετά πολυαρωματικά μόρια , τα οποία εμπεριέχονται στα ορυκτά έλαια έχουν χαρακτηριστεί ως καρκινογόνα. Όσον αφορά την οικο-τοξικότητα (ecotoxicity) , τα ορυκτά έλαια μπορούν να γίνουν επιβλαβή για το περιβάλλον , όταν υπάρχουν διαρροές στους ΜΤ και υπάρχει δυνητική συσσώρευση τους.(συσσώρευση στη χλωρίδα και τη πανίδα , με πιθανή μόλυνση της τροφικής αλυσίδας) .[2]

1.2.2 Φυσικοί Εστέρες ή Φυτικά Έλαια

Τα φυτικά έλαια αποτέλεσαν κομμάτι των πρώτων υγρών μονώσεων που χρησιμοποιήθηκαν στη κατασκευή ηλεκτρολογικού εξοπλισμού. Αποτελούνται κυρίως από τριγλυκερίδια (triglycerides), ο οποίος είναι στην ουσία ένας τριεστέρας (triester - ο χημικός τύπος ενός εστέρα είναι R-COO-R'), όπως αυτός αναπαρίσταται στο σχήμα 1.3 . Τα φυτικά έλαια είναι επίσης γνωστά και ως φυτικού ή φυσικοί εστέρες (εν αντιθέσι με τους συνθετικούς ή οργανικούς εστέρες), επειδή συντίθενται φυσικά από οποιονδήποτε ζωντανό οργανισμό και μπορούν να προκύψουν από διαφορετικά είδη σπόρων όπως του φυτού κρότωνα(ρετσινόλαδο), κράμβης, ηλιόσπορου, σιναπόσπορου, κτλ. . [3]



Σχήμα 1.3 Χημική Δομή φυτικού ελαίου (τριεστέρας-τριγλυκερίδιο)
(J. Martinez-Vega, Dielectric Materials For Electrical Engineers, WILEY)

Τα φυτικά έλαια συντίθενται φυσικά από όλους τους έμβιους οργανισμούς και εξάγονται μέσω της διαδικασίας της εστεροποίησης μίας απλής τρι-αλκοόλης, της γλυκερόλης, με τρία λιπαρά οξέα. Αυτά τα οξέα είναι μονο-καρβοξυλικά (γενικού τύπου R-COO-H) με αδέσμευτες γραμμικές αλυσίδες, περιέχοντας ζυγό αριθμό ατόμων άνθρακα (8-24). Μπορούν να είναι κορεσμένα(χωρίς διπλούς δεσμούς) ή ακόρεστα και ορισμένες φορές υδροξυλιωμένα (με δεσμό -OH). Η αντίδραση εστεροποίησης είναι η ακόλουθη [3]:

Γλυκερόλη + 3 λιπαρά οξέα → Τριγλυκερίδια + H₂O

Glycerol + 3 fatty acids ⇒ Triglycerides + water

(trialcohol) (acid) (triester)

Τα τριγλυκερίδια εξάγονται μέσω κονιορτοποίησης (trituration) (άλεσμα και πίεση) σπόρων (σόγιας, καλαμποκιού, ηλιόσπορου, κράμβης, σιναπιού, κρότωνα)

Χαρακτηριστικά

Βρίσκονται εδώ και καιρό στο προσκήνιο μελετών της επιστημονικής κοινότητας και σιγά σιγά όλα δείχνουν ότι κάποια στιγμή θα μπορέσουν να αντικαταστήσουν τα ορυκτά έλαια, δεδομένων και των επιθυμητών ιδιοτήτων που τα χαρακτηρίζουν. Πρόσφατα η πιστοποίηση IEC-60422/13 αναφέρθηκε για τις προδιαγραφές που θα πρέπει να έχουν ανά τη χρήση τους. Ένα από τα μεγάλα πλεονεκτήματα τους είναι η είναι η βιοδιασπασιμότητα τους, η οποία δυστυχώς τους επιφέρει ευαισθησία στην οξείδωση, το οποίο οδηγεί σε αύξηση του συντελεστή απωλειών, της οξύτητας τους καθώς και του ιξώδους τους. Γι' αυτό το λόγο , η χρήση τους είναι περιορισμένη σε στεγανό εξοπλισμό (καμία επικοινωνία με την

ατμόσφαιρα) και συνήθως αυτή τους η ευαισθησία αντισταθμίζεται χρησιμοποιώντας αντι-οξειδωτικά , τα οποία είναι βλαβερά για το περιβάλλον (' μη-πράσινα ' προϊόντα).

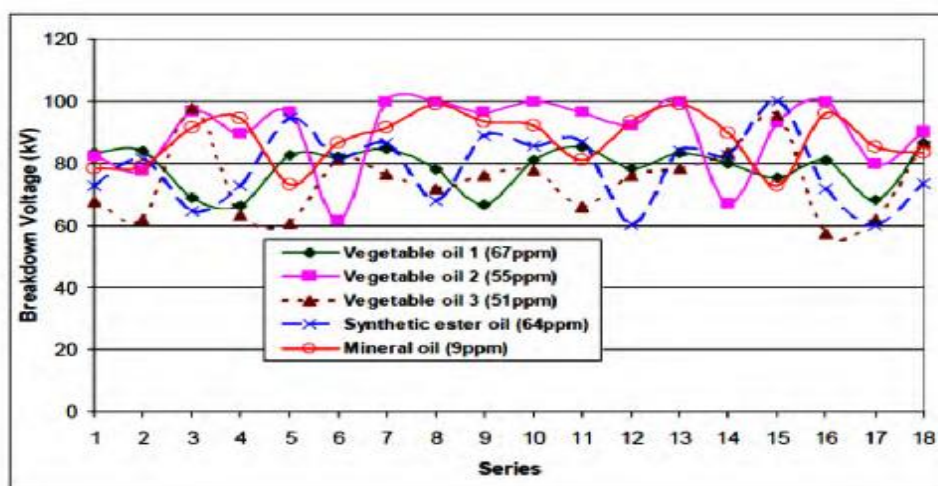
Τα άλλα τους πλεονεκτήματα είναι ότι δεν είναι εύφλεκτα και εμφανίζουν υψηλή διαλυτότητα στο νερό(όπως οι συνθετικοί εστέρες), συγκριτικά με τα ορυκτά έλαια. [3]

Εκτός από τα δύο αυτά πλεονεκτήματα, αυτό το είδος ελαίου, εμφανίζει μεγαλύτερο ιξώδες από τα ορυκτά έλαια και εξαιρετικά υψηλό σημείο πήξεως (περίπου -20°C), το οποίο περιορίζει τη μεταφορά θερμότητας και δυσχεραίνει τη χρήση τους σε χώρες των οποίων το κλίμα είναι κρύο.

Όσο πλουσιότερα είναι σε λιπαρά οξέα , εμφανίζουν χαμηλότερες τιμές ιξώδους και σημεία πήξεως. Επίσης όταν σε εκείνα τα λιπαρά οξέα είναι κορεσμένα κατά αναλογία , εμφανίζονται να είναι πιο ρευστά και με λιγότερη ευαισθησία στην οξείδωση.

Τέλος, αυτά τα νέα είδη φυτικών ελαίων φαίνεται να έχουν ηλεκτρικές ιδιότητες , παρόμοιες με των ορυκτών για μικρά διάκενα, σύμφωνα με τη τυποποίηση IEC 60156 (Διάγραμμα 2). Το διάκενο το οποίο χρησιμοποιείται στην IEC 60156 είναι απόστασης 2,5mm. Ενώ παράλληλα διεξάγονται περαιτέρω έρευνες για καταπόνηση φυτικών ελαίων υπό εναλλασσόμενη τάση συχνότητας 60 Hz για μεγαλύτερα διάκενα (δεκάδων mm). Η διηλεκτρική αντοχή τους φαίνεται να είναι μικρότερη και η συντελεστής απωλειών τους μεγαλύτερος. [3]

Διάγρ.2 Τάση διάσπασης μονωτικών ελαίων



Τάση διάσπασης διαφορετικών μονωτικών ελαίων σύμφωνα με τυποπ. IEC60156 (60Hz και 2,5mm διάκενο) (Alan Darwin, *The use of natural Esters in Transformers*, Matpost '07 conference, Lyon 15-16Nov)

Χρήσεις

Αυτό το είδος ελαίου χρησιμοποιείται κυρίως σε ΜΤ μικρού μεγέθους. Πάραυτα εξαιτίας της μαζικής ζήτησης στην αγορά, βιοδιασπώμενων προϊόντων , πολλοί μετασχηματιστές ισχύος φτιάχτηκαν ή αναγεμίστηκαν με σκοπό να χρησιμοποιηθούν φυτικά έλαια για τον εμποτισμό τους. Έτσι μπορούμε να βρούμε τέτοια φυτικά έλαια στο εμπόριο, όπως αυτό που κατασκευάστηκε από την εταιρία Cooper Power Systems και το οποίο χρησιμοποιήθηκε στη παρούσα διπλωματική για μετρήσεις υπό κρουστική καταπόνηση. Παρόμοια έλαια είναι το *Midel eN* από την εταιρία M&I, ή το *Biotemp* από την ABB. [3][2]

1.3 Χρήση μονωτικών λαδιών

Χρήση των μονωτικών λαδιών γίνεται στους παρακάτω τύπος συσκευών:

- Μετασχηματιστές
- Καλώδια
- Μονωτήρες διέλευσης
- Πυκνωτές
- Μετασχηματιστές μετρήσεων
- Ελαιοδιακόπτες

1.3.1 Μετασχηματιστές:

1.3.1.1 Γενικά

Η γρήγορη εξέλιξη της χρήσης του ηλεκτρισμού απαιτεί τη βελτίωση του συστήματος ισχύος, δηλαδή την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να υπάρχει ένα υψηλό επίπεδο ασφάλειας και αξιοπιστίας. Αυτό εμπερικλείει και τη δυνατότητα των καταναλωτών του δικτύου να έχουν την επιθυμητή τάση ανάλογα με την εγκατάστασή τους. Οι μετασχηματιστές συνιστούν μια τεχνολογία που καλύπτει αυτή την ανάγκη και έχει βρει πολλαπλές και ποικίλες εφαρμογές εδώ και δεκαετίες. Καλύπτουν ανάγκες μιας ευρείας γκάμας εγκαταστάσεων. Από τις πλέον μεγάλες είναι οι ηλεκτρικοί υποσταθμοί και από τις πλέον μικρές οι οικιακές ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές. Καθοριστική είναι η ύπαρξη των μετασχηματιστών στην ανύψωση και τον υποβιβασμό της τάσης στα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία ,ως γνωστόν ,είναι εξαιρετικά εκτεταμένα και καλύπτουν τα κέντρα κατανάλωσης του εθνικού ηλεκτρικού δικτύου διανομής.[5]

Καθώς η σφαίρα εφαρμογών των μετασχηματιστών είναι ευρεία, έχουμε διαφορετικούς τύπους μετασχηματιστών που ο σκοπός τους καθορίζει και τον τρόπο κατασκευής τους. Για παράδειγμα στους μετασχηματιστές τηλεπικοινωνιακών εφαρμογών, η κύρια απαίτηση συνίσταται στην πιστότητα αναπαραγωγής του σήματος, σε ευρεία περιοχή συχνότητας και τάσης. Στους μετασχηματιστές αυτούς το υλικό, οι διαστάσεις και η διάταξη των τυλιγμάτων υπαγορεύονται από την ανάγκη ύπαρξης ηλεκτρικών και μαγνητικών χαρακτηριστικών, τα οποία έχουν ως αποτέλεσμα ικανοποιητική απόκριση συχνότητας και ανεκτή παραμόρφωση. Οι συνήθεις τύποι μετασχηματιστών είναι:

α) Μετασχηματιστές ισχύος : Χρησιμοποιούνται στους σταθμούς παραγωγής για την ανύψωση της τάσης και στους υποσταθμούς για την ανύψωση ή για τον υποβιβασμό της τάσης μέχρι τη Μέση Τάση. Η ισχύς υπερβαίνει συνήθως τα 2MVA.

β) Μετασχηματιστές διανομής : Χρησιμοποιούνται στο δίκτυο διανομής ,για να μεταφέρουν ενέργεια από τη μέση τάση στο δίκτυο χαμηλής τάσης των καταναλωτών. Η ισχύς τους είναι από 50kVAέως και 1600kVA.

γ) Αυτομετασχηματιστές : για τη μετατροπή τάσεων εντός σχετικά μικρών ορίων, για σύνδεση συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας διαφόρων τάσεων, για εκκίνηση κινητήρων εναλλασσόμενου ρεύματος κ.τ.λ.

δ) Μετασχηματιστές δοκιμών : για εκτέλεση δοκιμών με υψηλή και υπερυψηλή τάση

ε) Μετασχηματιστές ανόρθωσης

στ) Μετασχηματιστές μετρήσεων : για σύνδεση οργάνων μετρήσεως σε δίκτυα με σκοπό τη μέτρηση της τάσεως και της εντάσεως

ζ) Μετασχηματιστές τηλεπικοινωνιών

Εν τούτοις σε όλες τις περιπτώσεις, οι κύριες μέθοδοι καθορισμού της λειτουργίας ενός μετασχηματιστή καθώς και της μελέτης των φαινομένων που λαμβάνουν χώρα σε αυτόν ,είναι ουσιαστικά οι ίδιες.[6][7]

1.3.1.2 Δομή μετασχηματιστή

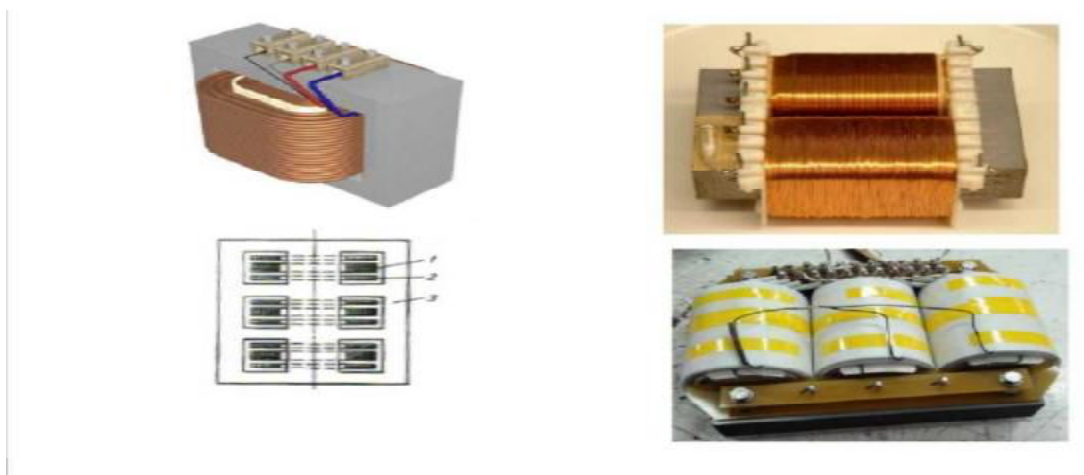
Ο μετασχηματιστής είναι μια ηλεκτρική μηχανή με σταθερά μέρη, η οποία έχει δύο πηνία για κάθε φάση,τα οποία είναι μαγνητικά συζευγμένα και ηλεκτρικά ανεξάρτητα μεταξύ τους. Το τυλίγμα που τροφοδοτούμε το ονομάζουμε πρωτεύον και αυτό από το οποίο παίρνουμε την ηλεκτρική ενέργεια με μετασχηματισμένη τάση το ονομάζουμε δευτερεύον.

Η λειτουργία του μετασχηματιστή βασίζεται σε δύο αρχές: πρώτον ότι το ηλεκτρικό ρεύμα μπορεί να παράγει μαγνητικό πεδίο και δεύτερον ότι ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο που διαρρέει ένα πηνίο επάγει τάση στα άκρα του πηνίου. Επομένως αλλάζοντας το ρεύμα στο πρωτεύον αλλάζει η μαγνητική ροή που εγκαθίσταται και η μεταβολή της μαγνητικής ροής επάγει μια τάση στο δευτερεύον του πηνίου. Ένας ιδανικός μετασχηματιστής ,όπως δείχνεται στο παραπάνω σχήμα έχει εγκατεστημένα τα πηνία του τυλιγμένα γύρω από έναν πυρήνα πολύ υψηλής μαγνητικής επιτρεπτότητας , όπως ο σίδηρος, έτσι ώστε η μαγνητική ροή να διατρέχει και τα δύο πηνία.

Ανάλογα με τη χρήση του μετασχηματιστή έχουμε αντίστοιχα επίπεδα τάσεως λειτουργίας και αντίστοιχα μονοφασικούς και τριφασικούς μετασχηματιστές. Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι μονοφασικών και τριφασικών μετασχηματιστών:

- τύπος πυρήνα: στο μονοφασικό τα τυλίγματα τοποθετούνται στα δύο σκέλη του μαγνητικού κυκλώματος. Κάθε σκέλος αυτού περιλαμβάνει το μισό των ελιγμάτων αμφοτέρων των τυλιγμάτων του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος. Τα δυο σκέλη ενώνονται με ζυγούς ,οι οποίοι κλείνουν το μαγνητικό κύκλωμα. Στον τριφασικό τύπου πυρήνα έχουμε τρία σκέλη αντί για δύο.
- τύπος κελύφους: στο μονοφασικό τα τυλίγματα του πρωτεύοντος και του δευτερεύοντος βρίσκονται στο μεσαίο σκέλος και το μαγνητικό κύκλωμα διαθέτει τώρα τρία σκέλη. Η διατομή του μεσαίου σκέλους είναι περίπου διπλάσια των δύο άλλων σκελών ,διότι η συνολική ροή στο μεσαίο σκέλος διανέμεται έτσι ,ώστε τα εξωτερικά σκέλη και οι ζυγοί να διαρρέονται από το μισό της ροής. Στον τριφασικό τύπου κελύφους έχουμε απλά συνένωση τριών μονοφασικών μετασχηματιστών τύπου κελύφους

Στο σχήμα 1.4 παρατηρούμε αριστερά ένα μονοφασικό μετασχηματιστή κελύφους (πάνω) και ένα αντίστοιχο τριφασικό (κάτω) δεξιά ένα μονοφασικό μετασχηματιστή τύπου πυρήνα (πάνω) και ένα αντίστοιχο τριφασικό (κάτω)[6][7][5]



1.3.1.3 Μετασχηματιστές ισχύος

Η εργασία μας επικεντρώνεται στους μετασχηματιστές ισχύος μέσης και υψηλής τάσης οι οποίοι είναι τριφασικοί και είναι συνήθως τύπου πυρήνα. Αυτοί, όπως είναι λογικό εμφανίζουν σημαντικές θερμικές απώλειες λόγω και των τυλιγμάτων (ωμικές απώλειες) και λόγω του πυρήνα (από υστέρηση και δινορρεύματα). Η απαγωγή της θερμότητας στον περιβάλλοντα χώρο και η ηλεκτρική μόνωση μεταξύ των μερών του μετασχηματιστή επιτυγχάνεται γενικά με αέρα ή με λάδι. Με βάση το μέσο ηλεκτρικής και θερμικής μόνωσης τους χωρίζονται σε μετασχηματιστές λαδιού και μετασχηματιστές ξηρού τύπου. Οι ξηρού τύπου μετασχηματιστές ψύχονται ή με ακτινοβολία και φυσική έλξη (αυτόψυξη) ή με τη βοήθεια ανεμιστήρα (εξωτερικός αερισμός) και χρησιμοποιούνται σε μικρής ισχύος μετασχηματιστές, μέχρι 25 kVA.



Σχ.1.5 Αριστερά: Μετασχηματιστής λαδιού
Δεξιά: Μετασχηματιστής ξηρού τύπου

Χρησιμοποιούμε μονωτικό λάδι στους μετασχηματιστές, γιατί είναι πρώτα απ' όλα κατάλληλο ψυκτικό μέσο. Απορροφά τη θερμότητα που παράγεται στα τυλίγματα και στον πυρήνα (Νόμοι των JOULE και FOYCAYLT) και την μεταφέρει στις ψυκτικές επιφάνειες των ψυγείων και στα τοιχώματα του δοχείου και από εκεί απάγεται στο περιβάλλον. Από τα μεν ψυγεία με τη βοήθεια ανεμιστήρων, από τα δε τοιχώματα με ακτινοβολία. Η κυκλοφορία του λαδιού είναι φυσική ή εξαναγκασμένη ανάλογα με το μέγεθος του μετασχηματιστή. Στους μικρούς, όπου έχουμε μεγάλη επιφάνεια του δοχείου σε σύγκριση με τη ποσότητα του λαδιού, δηλαδή το κλάσμα «επιφάνεια τοιχωμάτων»/όγκος περιεχόμενου λαδιού» έχει μεγάλη τιμή, έχουμε φυσική κυκλοφορία. Στους μεγάλους μετασχηματιστές είναι προσαρμοσμένοι σωλήνες ψύξεως, όπου κυκλοφορεί το λάδι, ενώ στους ακόμα πιο μεγάλους μεταχειριζόμαστε ποικίλες μεθόδους τεχνητής ψύξης, που περιλαμβάνουν συνδυασμούς από ψύξη με αέρα κυκλοφορούμενο από ανεμιστήρες, κυκλοφορία με αντλίες, σώματα που εκπέμπουν θερμότητα στον εξωτερικό αέρα ή νερό, και τέλος απ' ευθείας ψύξη με νερό που περνάει μέσα από έλικες τοποθετημένες μέσα στο λάδι πάνω από τα τυλίγματα. Η υπερθέρμανση του λαδιού είναι αυτή που συντελεί στην αλλοίωσή του. [5]

Σαν ψυκτικό μέσο το λάδι είναι καλύτερο από τον αέρα, γιατί έχει μεγαλύτερη ειδική θερμότητα απ' αυτόν.

Επίσης είναι καλύτερο από τον αέρα και σαν μονωτικό μέσο, γιατί έχει μεγαλύτερη διηλεκτρική αντοχή και διηλεκτρική σταθερά, και αυτή είναι η δεύτερη σπουδαία ιδιότητά του. Καθώς το λάδι παρεμβάλλεται ανάμεσα στα διάφορα στοιχεία του μετασχηματιστή, που έχουν διαφορετικά δυναμικά, εμποδίζει την ηλεκτρική υπερπήδηση και ενισχύει τις μονωτικές ιδιότητες που έχουν οι μονώσεις των τυλιγμάτων, εμποδίζοντας την εισχώρηση

υγρασίας σ' αυτές. Είναι γνωστό ότι οι πιο πάνω μονώσεις (χαρτί, βαμβάκι) έχουν σαν βάση την κυτταρίνη και απορροφούν υγρασία από τον αέρα, όταν τις εκθέσουμε σ' αυτόν. Η απορρόφηση υγρασίας έχει σαν αποτέλεσμα να μειωθούν οι μονωτικές τους ικανότητες. Κατά καλή σύμπτωση το λάδι έχει χαμηλή διηλεκτρική σταθερά (σε σχέση με τα στέρεα μονωτικά) και αυτό συντελεί στην ελάφρυνση των καταπονήσεων των στερεών μονώσεων.

Άλλο πλεονέκτημα από τη χρησιμοποίηση του μονωτικού λαδιού είναι η παρεμπόδιση σχηματισμού μικροσκοπικών φυσαλίδων αέρα και αερίων στις μονώσεις των τυλιγμάτων. Παρ' όλο που οι μονώσεις από χαρτί εφαρμόζονται πάνω στους αγωγούς με προσοχή, απομένουν μικρά διάκενα μεταξύ των μονώσεων και μεταξύ μονώσεων και αγωγών. Ο αέρας που υπάρχει στα διάκενα αυτά ιονίζεται και έτσι είναι δυνατό να προκληθούν απώλειες και καταστροφή των μονώσεων. Το λάδι όμως γεμίζει τα διάκενα και παρεμποδίζει τον ιονισμό. Το μονωτικό λάδι τέλος, χρησιμεύει, για να απομακρυνθούν τα μικρά, άλλα σημαντικά σε πλήθος, ίχνη ξένων σωμάτων και υγρασίας, που μπορεί να βρίσκονται σε κάθε καινούργιο μετασχηματιστή. Τα ίχνη αυτά απομακρύνονται με την κυκλοφορία του λαδιού, που προκαλείται από διάταξη διήθησης (φίλτρο).

Η περιεκτικότητα των μετασχηματιστών ανύψωσης τάσης σε λάδι είναι μεγαλύτερη και ανέρχεται ακόμα και πάνω από 130.000 lt. Λειτουργούν στις ψηλότερες τάσεις και είναι εφοδιασμένοι με συντηρητές και με μονάδες ξήρανσης, για να περιορίζουν την είσοδο νερού και αέρα, εξασφαλίζοντας έτσι μεγαλύτερο χρόνο ζωής στο λάδι και κατ' επέκταση και στη συσκευή. Οι μετασχηματιστές διανομής περιέχουν από 20-10.000 lt λαδιού και λειτουργούν κάτω από τα 70 kV περίπου.

Σ' αυτού του τύπου τους μετασχηματιστές η οξείδωση είναι ο κυριότερος παράγοντας, που επηρεάζει τη διάρκεια ζωής του λαδιού, λόγω του ότι είναι πολύ μεγάλος ο λόγος του εισερχομένου αέρα προς τον όγκο λαδιού και επίσης οι θερμοκρασίες λειτουργίας είναι γενικά ψηλότερες.[6][7]

1.3.1.4 Βασικά κατασκευαστικά μέρη ενός μετασχηματιστή ισχύος λαδιού

Τα βασικά μέρη ενός μετασχηματιστή μεγάλης ισχύος με ηλεκτρομονωτικό λάδι είναι:

- ο Ένα κατάλληλο χαλύβδινο δοχείο που περικλείει τον πυρήνα και τα τυλίγματα, το οποίο είναι γεμάτο με μονωτικό λάδι. Στο πάνω μέρος του δοχείου υπάρχει σιδερένιο καπάκι που στερεώνεται στο δοχείο περιφερειακά με βίδες. Πάνω στο καπάκι τοποθετούνται οι μονωτήρες μέσης και υψηλής τάσης, ενώ στα πλευρικά βρίσκονται κατάλληλες υποδοχές για την τοποθέτηση των ψυγείων ψύξεως του λαδιού. Όταν τα τυλίγματα του μετασχηματιστή διαρρέονται από ρεύμα, εκλύεται κατά το γνωστό φαινόμενο Joule θερμότητα. Έτσι έχουμε μια απώλεια ενέργειας από το χαλκό των τυλιγμάτων. Ωστόσο θερμότητα εκλύεται επίσης από τον πυρήνα λόγω κυκλοφορίας μέσα σε αυτόν των δινορρευμάτων. Η θερμότητα που εκλύεται πρέπει να αποβάλλεται στο περιβάλλον, για να μην πλησιάζει η θερμοκρασία του μετασχηματιστή σε επικίνδυνα όρια. Το μονωτικό λάδι είναι αυτό που λειτουργεί σαν ψυκτικό μέσο. Τα τυλίγματα κατασκευάζονται από σύρματα μονωμένα.

- ο Το σώμα του πυρήνα αποτελείται από λεπτά σιδερένια ελάσματα, μονωμένα μεταξύ τους ηλεκτρικά. Επειδή στον πυρήνα εμφανίζεται το φαινόμενο της ανάπτυξης δινορρευμάτων, με κατάλληλη κατεργασία μετάλλων και με κατάλληλες προσμίξεις έχει επιτευχθεί η μείωση των απωλειών του πυρήνα στο ελάχιστο. Τα ελάσματα πρέπει να έχουν κατάλληλο σχήμα, ώστε να μπαίνουν τα πηνία εύκολα στα ανοίγματα που σχηματίζουν.

- ο Τους μονωτήρες μέσης και υψηλής τάσης που χρησιμεύουν για την ασφαλή διέλευση του ρεύματος. Οι μονωτήρες υψηλής τάσης είναι συνήθως τύπου πυκνωτή. Το εσωτερικό του μονωτήρα αποτελείται από μονωτικό υλικό, συνήθως χαρτί στο οποίο έχουν παρεμβληθεί κύλινδροι από φύλλα κασίτερου ή αλουμινίου. Με τον τρόπο αυτό, από τον αγωγό διέλευσης μέχρι το σώμα του μετασχηματιστή παρεμβάλλεται μια σειρά από πυκνωτές ίσης

χωρητικότητα. Σκοπός των πυκνωτών αυτών είναι η ομαλή κατανομή της τάσης σε όλο το πάχος του μονωτικού,για να μην καταπονούνται ηλεκτρικά ορισμένα τμήματα της μόνωσης. Αναφορικά με τους μονωτήρες μέσης τάσης δύο είναι οι βασικοί τύποι που χρησιμοποιούνται:

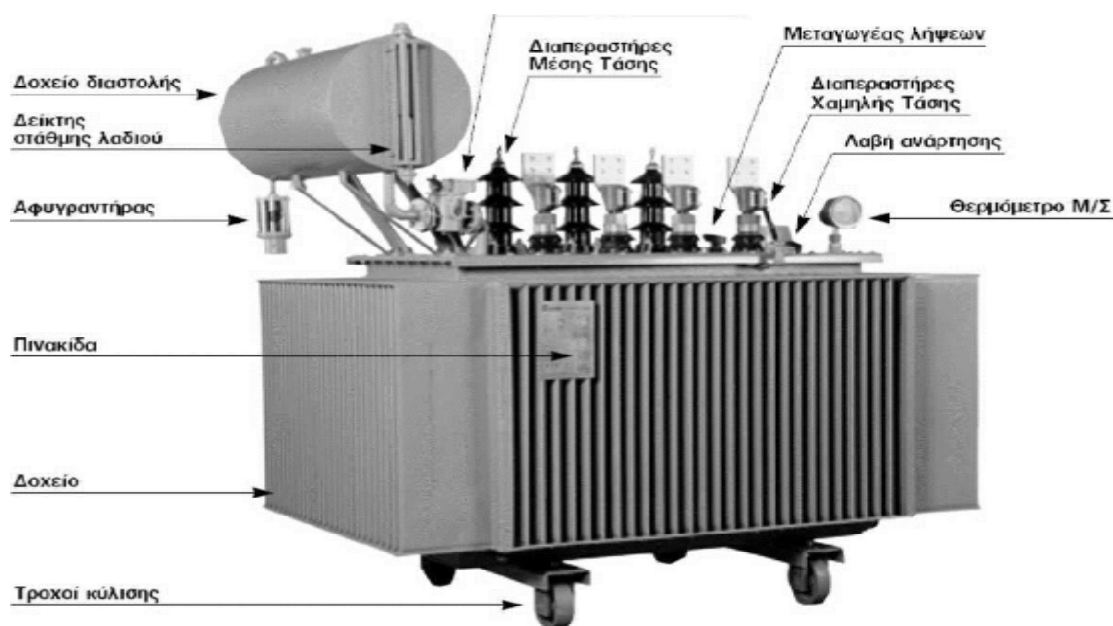
§ ο ένας είναι όμοιος με αυτούς της υψηλής τάσης και ο άλλος συνίσταται σε έναν μονωτήρα από πορσελάνη, ο οποίος είναι γεμάτος με λάδι το οποίο επικοινωνεί υδραυλικά με το λάδι ψύξης του μετασχηματιστή.

§ - Το δοχείο διαστολής, το οποίο χρησιμεύει,για να δέχεται την αύξηση του όγκου του λαδιού,όταν αυτό θερμαίνεται κατά τη λειτουργία του μετασχηματιστή. Στο δοχείο διαστολής υπάρχει δείκτης στάθμης λαδιού,ώστε να ελέγχεται οπτικά η ποσότητα του λαδιού που υπάρχει μέσα σε αυτό. Ο δείκτης μπορεί να είναι ένας απλός γυάλινος σωλήνας,που δείχνει τη στάθμη με βάση την αρχή των συγκοινωνούντων δοχείων ή ένας μαγνητικός δείκτης, που καταγράφει τη στάθμη με μια κατακόρυφη σειρά από μικρούς μαγνήτες, οι οποίοι ενεργοποιούνται από πλωτήρα με μεταλλικό στοιχείο που επιπλέει μέσα στο δοχείο.

§ - Το ψυγείο του λαδιού που χρησιμεύει για την ψύξη του λαδιού. Για την καλύτερη απαγωγή της θερμότητας τοποθετούνται εξωτερικά του δοχείου του μετασχηματιστή τα ψυγεία που διαθέτουν εκτεταμένες επιφάνειες εναλλαγής θερμότητας. Στους μετασχηματιστές μεγάλης ισχύος με λάδι η ψύξη του λαδιού διευκολύνεται ακόμη περισσότερο με την εξαναγκασμένη κυκλοφορία του αέρα χρησιμοποιώντας ανεμιστήρες

§ - Την ασφαλιστική διάταξη Bouchholtz, η οποία τοποθετείται μεταξύ του δοχείου διαστολής και του σώματος του μετασχηματιστή. Αυτή φέρει έναν πλωτήρα οπτικής και ηχητικής σήμανσης, έναν πλωτήρα διακοπής , έναν εξαεριστικό κρουνό και έναν κρουνό αποστράγγισης και συνιστά μια διάταξη ευαίσθητη και αξιόπιστη για την προστασία ενός μετασχηματιστή από διαρροή λαδιού και υπερθέρμανση. Αυτό ,γιατί αν εξαιτίας μιας διαρροής λαδιού ,αδειάσει το δοχείο διαστολής και κατέβει η στάθμη του λαδιού κάτω από τον πλωτήρα σήμανσης ,θα κλείσουν οι επαφές της διάταξης Bouchholtz ,θα ηχήσει σειρήνα και θα αρχίσει να αναβοσβήνει μια λάμπα.

§ - Τον αφυγραντήρα , που μπορεί να είναι εφοδιασμένος με χημικό φίλτρο ,ώστε να εμποδίζει την "εισπνοή" της υγρασίας από την ατμόσφαιρα στο δοχείο. Αυτός συνεισφέρει στην ασφαλή και έμπιστη λειτουργία του μετασχηματιστή, καθώς η υγρασία ελαττώνει τη διηλεκτρική δυνατότητα του λαδιού και τη μονωτική ικανότητα του μονωτικού χαρτιού.[6][7]



Σχ.1.6 Δομικά μέρη μετασχηματιστή ισχύος

1.3.1.5 Μονωτικό χαρτί

Το μονωτικό χαρτί από πολτό ξύλου, επειδή είναι ευκολότερο να κατασκευαστεί από άλλα υλικά, χρησιμοποιείται σε μια ποικιλία συστημάτων μόνωσης καλωδίων, πυκνωτών αλλά και μετασχηματιστών. Ο πιο συνηθισμένος τύπος του είναι το Kraftpapier. Αποτελείται από 90% κυτταρίνη (cellulose), 6-7% λιγνίνη (lignin) και 3-4% πεντοσάνες (pentosans). Όσον αφορά τους μετασχηματιστές, αποτελεί το βασικό στερεό μονωτή (χρησιμοποιείται ως περιέλιξη στα τυλίγματα), αφού σε ένα μετασχηματιστή υψηλής τάσης μπορεί να περιέχονται περίπου 12 τόνοι μονωτικού χαρτιού και 40 τόνοι μονωτικού ελαίου.

Έχει αποδειχθεί ότι το μονωτικό χαρτί έχει αρκετά καλές φυσικές και χημικές ιδιότητες, για να χρησιμοποιηθεί ως ηλεκτρομονωτικό υλικό. Έχει όμως ένα σημαντικό μειονέκτημα αποσυντίθεται εύκολα. Αυτή η διάσπαση παράγει παραπροϊόντα όπως νερό, CO, CO₂, τα οποία μειώνουν την συνολική ικανότητα μόνωσης και είναι επικίνδυνα για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. [6][7]

1.3.1.6 Χρόνος ζωής μετασχηματιστή

Αιτίες αστοχίας μετασχηματιστή

Ο χρόνος ζωής ενός μετασχηματιστή αποτελεί τη χρονική διάρκεια κατά την οποία η συσκευή θα μπορεί να εκτελεί τη λειτουργία της στο δίκτυο. Σχετίζεται κυρίως με την υποβάθμιση της μόνωσης, που προκαλείται από τη θερμική καταπόνηση του μονωτικού χαρτιού και από την ηλεκτροχημική αποσύνθεση του λαδιού. Τα παραγόμενα παραπροϊόντα μέσα στο μονωτικό υγρό είναι το νερό και άλλα συστατικά μερικώς πολωμένου ή ιονισμένου χαρακτήρα. Επίσης, κατά τη διάρκεια της αποικοδόμησης του ελαίου συντελείται η θραύση των μοριακών αλυσίδων των υδρογονανθράκων και αναπτύσσονται αέρια παραπροϊόντα, τα οποία αφήνουν μεγάλες ελεύθερες ρίζες στην υγρή φάση. Οι συγκρούσεις μεταξύ τέτοιων ελεύθερων ριζών παράγουν συνήθως μεγάλα συσσωματώματα κolloειδών προϊόντων αποσύνθεσης με ένα μέσο μοριακό βάρος από 450 έως 550, τα οποία δεν είναι πλέον διαλυτά στο έλαιο και καθιζάνουν με τη μορφή λάσπης ή στάχτης.

Ο χρόνος ζωής δεν εξαρτάται μόνο από τη φόρτιση, αλλά επηρεάζεται και από τον τύπο του χαρτιού, τη σύνθεσή του, την υγρασία και την παρουσία οξυγόνου, όπως και από το επίπεδο οξύτητας του λαδιού. Όσο η υποβάθμιση της μόνωσης εξελίσσεται, τα επίπεδα οξύτητας του ορυκτέλαιου αυξάνονται και συμβαίνουν ηλεκτροχημικές αντιδράσεις μεταξύ του λαδιού και των μεταλλικού εξοπλισμού του μετασχηματιστή (κυρίως με το δοχείο που εμπερικλείει τη συσκευή). Επίσης, η υποβάθμιση του μονωτικού λαδιού μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση της υγρασίας, στην ενίσχυση της πιθανότητας για μικρο-εκκενώσεις της μόνωσης και στη μείωση της διηλεκτρικής αντοχής του συστήματος μόνωσης χαρτί-λάδι.

Συχνά, συμβαίνουν αστοχίες σε μετασχηματιστές υψηλής και υπερυψηλής τάσης εξαιτίας του νηματοειδούς αγωγίμου διάυλου ηλεκτρονίων (streamingelectrification). Αυτό το φορτίο δημιουργείται στις διεπιφάνειες μεταξύ του κινούμενου μονωτικού ελαίου και των στερεών μονωτικών υλικών του μετασχηματιστή ισχύος. Με την πάροδο του χρόνου, η μόνωση του μετασχηματιστή αδυνατίζει και κάθε είδους αστοχίες μπορούν να συμβούν στο μετασχηματιστή, που μπορούν να οδηγήσουν μέχρι και στην έκρηξη αυτού. Η έκρηξη του μετασχηματιστή συνοδεύεται με τη διαρροή λαδιού, γεγονός το οποίο είναι επιβλαβές για το περιβάλλον.[5]



Σχ.1.7 Μετασχηματιστής λαδιού έπειτα από έκρηξη

Τα αποτελέσματα της καταστροφής ενός μετασχηματιστή είναι ,πέραν της καταστροφής του περιβάλλοντος, το ρίσκο σωματικής βλάβης για τους εργαζόμενους της περιοχής και το μεγάλο κόστος για την αντικατάστασή του. Βέβαια η γήρανση δεν αποτελεί το μόνο λόγο αστοχίας σε μετασχηματιστή. Εάν συνέβαινε αυτό ,τότε θα είχαμε πολύ λιγότερα προβλήματα να λύσουμε. Οι αστοχίες προκαλούνται είτε από εσωτερικούς ή από εξωτερικούς παράγοντες. Για τους εσωτερικούς αναφερθήκαμε πιο πάνω (αστοχία μόνωσης, κατασκευαστικά λάθη, μόλυνση λαδιού) και είναι αυτοί οι οποίοι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων προκαλούν την αστοχία.

Ο κυριότερος λόγος αστοχιών είναι η δυσλειτουργία της μόνωσης του μετασχηματιστή, που οφείλεται στην οξύτητα, στην οξείδωση και στη θερμότητα.

Σύμφωνα με μελέτες, τα τελευταία χρόνια οι αστοχίες στους μετασχηματιστές του ηλεκτρικού δικτύου έχουν αυξηθεί. Η αυξανόμενη χρησιμοποίηση του εξοπλισμού λόγω των αυξανόμενων αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια ,σε συνδυασμό με τη μη επένδυση κεφαλαίου για τη συντήρηση και αναβάθμιση του εξοπλισμού οδηγούν σε αυτό το αποτέλεσμα. [6][7]

Επίδραση της γήρανσης του λαδιού στη μιγαδική διηλεκτρική σταθερά

Με βάση τα παραπάνω για διάφορους λόγους προκαλείται υποβάθμιση της μόνωσης του μετασχηματιστή. Κατά τη γήρανση του λαδιού του μετασχηματιστή ,λόγω του ότι εμφανίζονται παραπροϊόντα,η διηλεκτρική σταθερά, όπως και οι διηλεκτρικές απώλειες, αυξάνονται. Όπως είναι λογικό τα αέρια και οι υγροί υδρογονάνθρακες που δημιουργούνται ως παραπροϊόντα αυξάνουν τη δυνατότητα αποθήκευσης φορτίου καθώς και το ρεύμα απωλειών. [6][7]

1.3.2 Καλώδια:

Το μονωτικό λάδι χρησιμοποιείται στα υπόγεια και υποβρύχια καλώδια για:

- Να ενισχύσουμε την μόνωσή τους που είναι από χαρτί
- Να παρεμποδίσουμε την εισχώρηση υγρασίας
- Να ψύχουμε τον αγωγό του καλωδίου, όπως συμβαίνει με τα καλώδια τύπου PIRELLI.

Αρχικά τα καλώδια χαμηλής τάσης χρησιμοποιούσαν ως μόνωση θεϊκωμένη άσφαλτο. Αυτή όμως αλλοιωνόταν πολύ γρήγορα, με αποτέλεσμα στις υψηλές θερμοκρασίες να έχουμε σχηματισμό κενών που μπορούσαν να ιονιστούν. Για να αντιμετωπισθεί το φαινόμενο αυτό

,χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία σαν πηκτικό το κολοφώνιο που ενίσχυε την προσκόλληση του διαποτιστικού υλικού. Αργότερα με την αύξηση των τάσεων μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας παρατηρήθηκαν συχνές διασπάσεις της μόνωσης του καλωδίου που οφειλόταν στα κενά που δημιουργούσε η συστολή του υλικού στις χαμηλές θερμοκρασίες. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκαν και χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα παραφινικά έλαια που αναμιγνύονται με πυκνωτικά ,όπως είναι το κολοφώνιο. Το ποσοστό του πυκνωτικού εξαρτάται από τη τοποθέτηση του καλωδίου. Στα οριζόντια καλώδια αναμιγνύεται λιγότερο πυκνωτικό από ότι στα κατακόρυφα. Επειδή το παραπάνω υλικό που χρησιμοποιείται για τη πλήρωση του καλωδίου έχει μικρή διηλεκτρική αντοχή ,δεν χρησιμοποιείται σε καλώδια υψηλών τάσεων. Έτσι για καλώδια μέχρι 66 kVέχουμε παχύρρευστα λάδια, πολλές φορές αναμιγμένα με εξευγενισμένο κολοφώνιο. Το εξευγενισμένο κολοφώνιο έχει βέβαια μικρότερες απώλειες .Δεν έχει όμως ικανοποιητική διαλυτότητα στα λάδια παραφινικής βάσης ,ενώ στις χαμηλές θερμοκρασίες παίρνει κρυσταλλική μορφή ,όταν οξειδωθεί. Εξ αιτίας αυτού προτιμώνται τα λάδια παραφινικής βάσης που έχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

α) Διατηρούν το κολοφώνιο εύκολα, ακόμα και όταν οξειδωθεί

β) Είναι πιο λεπτόρρευστα στις θερμοκρασίες διαποτισμού

γ) Έχουν μικρότερες απώλειες

Αναφορικά με τα καλώδια που προορίζονται για τάσεις πάνω από 66kVχρησιμοποιείται λάδι με πίεση. Τελευταίες έρευνες πάνω στην αντοχή των λαδιών τους, έδειξαν ότι αυτά παθαίνουν φυσικοχημικές αλλοιώσεις, ακόμα και σε κανονική λειτουργία του καλωδίου, επειδή μολύνονται από τα προϊόντα των αντιδράσεων που προκαλούνται από την ανύψωση της θερμοκρασίας. Η μόλυνση και οι αλλοιώσεις επιδρούν πάνω στις διηλεκτρικές απώλειες του λαδιού και του καλωδίου. Κανονικά οι απώλειες αυξάνουν ανάλογα με τη θερμοκρασία και πρακτικά είναι ανεξάρτητες από την τάση. Δηλαδή η συνδυασμένη επίδραση της θερμότητας και της τάσης με την παρουσία χαλκού και σιδήρου προκαλεί γήρανση του λαδιού χωρίς όμως να σχηματισθούν κατάλοιπα οξείδωσης ,όπως συμβαίνει με την οξείδωση στον αέρα. Αυτά βέβαια είναι αντίθετα με την άποψη, που ήταν δεκτή μέχρι πρότινος και έλεγε ότι το λάδι του καλωδίου δεν οξειδώνεται ,μιας και δεν υπάρχει αέρας μέσα στο καλώδιο. Επειδή οι αλλοιώσεις του λαδιού δεν προσβάλλουν το μονωτικό χαρτί, μπορούμε να αφαιρέσουμε το γηρασμένο λάδι, να ξεπλύνουμε τα καλώδια με λάδι και να τα γεμίσουμε με καινούργιο ,για να τα χρησιμοποιήσουμε εκ νέου. Τα λάδια που χρησιμοποιούνται σε καλώδια υψηλής τάσης πρέπει να αντέχουν σε μεγάλες θερμοκρασίες και στη γήρανση. Επίσης πρέπει να εκλύουν όσο το δυνατό λιγότερα αέρια και να είναι παχύρρευστα ,αν δεν προορίζονται για κυκλοφορία μέσα στα καλώδια. Τόσο το λάδι όσο και το μονωτικό επιλέγονται κατά τέτοιο τρόπο ,ώστε κάτω από οποιοσδήποτε συνθήκες λειτουργίας το λάδι να διαποτίζει τη μόνωση από χαρτί.

Τα λάδια που προορίζονται για καλώδια πρέπει να ελέγχονται ως προς τη χημική τους σύνθεση, το χαμηλό σημείο ροής και την απουσία μέσα σε αυτά κεριού. Οι βασικές ιδιότητες των λαδιών των καλωδίων αναφέρονται παρακάτω:

- Η εσωτερική τριβή πρέπει να είναι όσο το δυνατό χαμηλή με αποδεκτή πηκτικότητα. Η χαμηλή εσωτερική τριβή κάνει δυνατό το σχεδιασμό συστημάτων που μπορούν να λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες.

- Το λάδι πρέπει να έχει τη δυνατότητα απορρόφησης κάθε αερίου που ίσως παραμένει στο καλώδιο μετά την εγκατάσταση.

- Η tanδ πρέπει να είναι όσο το δυνατόν μικρότερη σε συνδυασμό με καλή χημική σταθερότητα ακόμα και στις πιο υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας.

Πάντως τα λάδια σαν υλικά εμποτισμού μπορούν να καταταγούν σε δύο κατηγορίες:

- Παχύρρευστα που περιέχουν εξευγενισμένο κολοφώνιο ή πολυμερείς υδρογονάνθρακες.

- Λάδια με χαμηλή εσωτερική τριβή (ιξώδες).[5]

1.3.3 Μονωτήρες διέλευσης:

Οι μονωτήρες διέλευσης των μετασχηματιστών περιέχουν μονωτικό λάδι που μπορεί να είναι το ίδιο με του μετασχηματιστή. Αν το λάδι του μονωτήρα επικοινωνεί με το λάδι του μετασχηματιστή ,τότε αυτό βρίσκεται σε πίεση που οφείλεται στη στάθμη του λαδιού του δοχείου διαστολής.

Αν το λάδι του μονωτήρα διέλευσης δεν επικοινωνεί με το λάδι του μετασχηματιστή ,τότε είναι ένα παχύρρευστο ειδικό λάδι με διηλεκτρική αντοχή που δεν μεταβάλλεται ακόμα και με πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Οι μονωτήρες διέλευσης των μετασχηματιστών αλλά και των διακοπών είναι στεγανοί και έχουν χώρο διαστολής του υγρού που δεν επικοινωνεί με την ατμόσφαιρα και άρα δεν επηρεάζεται από τις συνθήκες. Η γωνία διηλεκτρικών απωλειών του μονωτικού λαδιού που προορίζεται για μονωτήρες διέλευσης επιδρά πάνω στη χρήση του, αλλά όχι τόσο πολύ όσο στη χρήση του λαδιού που προορίζεται για πυκνωτές. Γι' αυτό το λάδι των μετασχηματιστών είναι γενικά κατάλληλο για μονωτήρες διέλευσης. Ειδικά στους μονωτήρες διέλευσης υπερύψηλης τάσης (420kV) χρησιμοποιείται λάδι που περιέχει πρόσθετο βελτιωτικό.[5]

1.3.4 Πυκνωτές:

Στους πυκνωτές το μονωτικό υγρό ενισχύει και διαποτίζει τη μόνωσή τους. Ο διαποτισμός πραγματοποιείται με την ύπαρξη μεγάλου κενού και υπό μεγάλη θερμοκρασία μετά από τέλεια ξήρανση. Τα φύλλα αλουμινίου με την ενδιάμεση διαποτισμένη μόνωση κλείνονται μέσα σε στεγανό σφραγιστό μεταλλικό δοχείο. Το γεγονός αυτό αποκλείει τη δυνατότητα αντικατάστασης ή συμπλήρωσης του υγρού, επομένως η διάρκεια ζωής του υγρού είναι και η διάρκεια ωφέλιμης ζωής του πυκνωτή. Φυσικά το υγρό δεν μπορεί να οξειδωθεί,αφού δεν έρχεται σε επαφή με τον αέρα και η θερμοκρασία λειτουργίας δεν είναι υψηλή. Το υγρό πρέπει να αντέχει σε πεδιακές εντάσεις γύρω στα 100 kV/cm, ενώ στους μετασχηματιστές οι εντάσεις αυτές είναι γύρω στα 45 kV/cm.

Αρχικά τα έλαια των πυκνωτών ήταν όμοια με αυτά των μετασχηματιστών, ενώ τελευταία χρησιμοποιούνται ειδικά έλαια, αφού οι συνθήκες λειτουργίας των πυκνωτών διαφέρουν από αυτές των μετασχηματιστών. Τα έλαια των πυκνωτών χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν αυτά που προέρχονται από ορυκτά πετρέλαια ,ενώ στη δεύτερη τα χλωρισμένα συνθετικά υγρά που όλα έχουν για βάση τους το PCB (polychlorinatedbiphenyl). Τα τελευταία κυκλοφορούν στην αγορά με τις ονομασίες Inerteen , clorphen, pyranolκ.λ.π. Αυτά πλεονεκτούν λόγω χαμηλών διηλεκτρικών απωλειών καθώς και εξαιτίας του γεγονότος ότι δεν αναφλέγονται . Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά σχεδόν, τα τελευταία χρόνια. Επειδή όμως το PCB αποδείχτηκε ότι μολύνει το περιβάλλον, αντικαταστάθηκε με άλλα υγρά τα τελευταία χρόνια. Ένα απ' αυτά έχει την εμπορική ονομασία XFS-4169L. Αυτό έχει τοξικότητα 20 φορές μικρότερη από υγρά που βασίζονται στο PCB. Επίσης έχει σημεία ανάφλεξης και καύσης μεγαλύτερα από τα αντίστοιχα του ορυκτού μονωτικού λαδιού. [8]

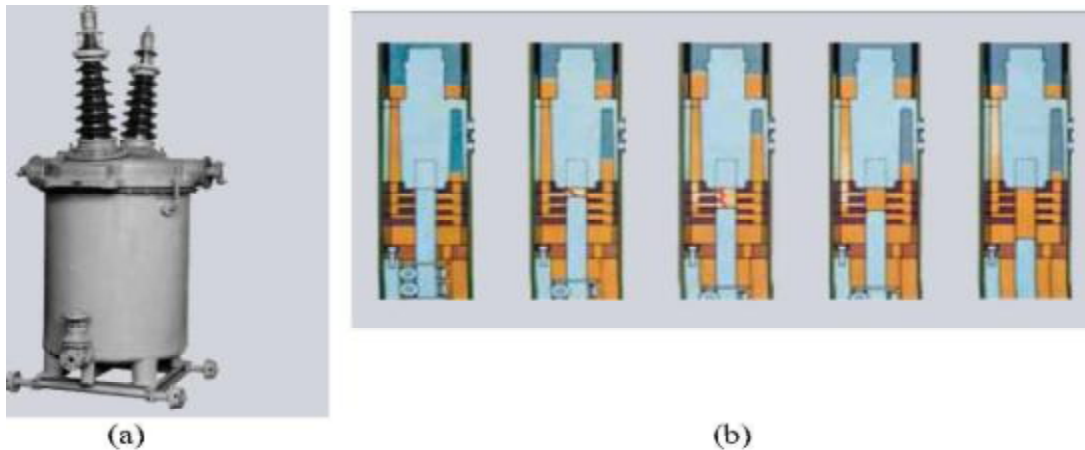
1.3.5 Μετασχηματιστές μετρήσεων:

Στους μετασχηματιστές μετρήσεων (τάσης και έντασης) χρησιμοποιούνται μονωτικά λάδια, ίδια με αυτά των μετασχηματιστών ισχύος για τον εμποτισμό του στερεού υλικού που γενικά είναι ειδικό χαρτί.[8]

1.3.6 Ελαιοδιακόπτες:

Ο διακόπτης κυκλώματος είναι ένας αυτόματης λειτουργίας ηλεκτρικός διακόπτης που αποσκοπεί στην προστασία ενός ηλεκτρικού κυκλώματος από ζημιές που προκλήθηκαν από υπερφόρτωση ή βραχυκύκλωμα. Σε αντίθεση με την ασφάλεια, η οποία λειτουργεί μία φορά και στη συνέχεια πρέπει να αντικατασταθεί, ο διακόπτης κυκλώματος μπορεί να επαναφέρεται (είτε με το χέρι ή αυτόματα), για να συνεχιστεί η κανονική λειτουργία του. Αυτόματοι διακόπτες κυκλώματος υπάρχουν σε διαφορετικά μεγέθη, από μικρούς διακόπτες που προστατεύουν οικιακές συσκευές, μέχρι μεγάλους διακόπτες που αποσκοπούν στην προστασία των κυκλωμάτων υψηλής τάσης που τροφοδοτούν μια ολόκληρη πόλη.

Οι διακόπτες που χρησιμοποιούν ως μέσο σβέσης του τόξου μονωτικό λάδι, ονομάζονται διακόπτες ελαίου. Στους διακόπτες ελαίου, το λάδι εξυπηρετεί σε δύο σκοπούς. Λειτουργεί σαν μονωτής μεταξύ των φάσεων και μεταξύ φάσης-γης και αποτελεί το μέσο για την σβέση του τόξου. Όταν το ηλεκτρικό τόξο αποσβένεται μέσω του λαδιού, το λάδι ατμοποιείται και δημιουργείται μια φυσαλίδα γύρω από το τόξο. Το αέριο στο εσωτερικό της φυσαλίδας είναι κατά 80% υδρογόνο, το οποίο εντείνει τον ιονισμό. Η αποσύνθεση του λαδιού απαιτεί ενέργεια, η οποία προέρχεται από τη θερμότητα που γεννά το τόξο. Το λάδι που υπάρχει γύρω από τη φυσαλίδα απομακρύνει τη θερμότητα από το τόξο και επίσης συνεισφέρει στον αποιονισμό του τόξου. Το βασικό μειονέκτημα των ελαιοδιακοπών είναι η χαμηλή αναφλεξιμότητα του λαδιού και η αναγκαία συντήρησή του, ώστε να κρατιέται το λάδι σε καλή κατάσταση (π.χ. αντικατάσταση και καθαρισμός του).[5]



Σχ. 1.8 (a) Ελαιοδιακόπτης εξωτερικού χώρου, 110 kV, 350 A. (b) Απόσβεση ηλεκτρικού τόξου σε διακόπτη ελαίου

Στις τάσεις μετάδοσης κάτω από 345 kV, οι διακόπτες ελαίου ήταν δημοφιλείς. Χάνουν όλο και περισσότερο έδαφος από τους αεριο-μονωτικούς διακόπτες ισχύος, όπως οι διακόπτες κενού και οι διακόπτες SF6. [7]

1.4. Ιδιότητες μονωτικών λαδιών

Οι ιδιότητες των μονωτικών λαδιών χωρίζονται σε φυσικές, χημικές, και ηλεκτρικές. Ελέγχοντας κάποια χαρακτηριστικά του μονωτικού λαδιού προσδιορίζεται η κατάσταση του. Γι αυτό έχει μεγάλη σημασία η ανάλυσή τους και ο προσδιορισμός των αναγκαίων τιμών και περιορισμών για την κανονική λειτουργία του μετασχηματιστή. [9]

1.4.1 Φυσικές ιδιότητες

Στις φυσικές ιδιότητες περιλαμβάνονται ιδιότητες όπως η επιφανειακή τάση, το χρώμα, η καθαρότητα, τα σημεία ανάφλεξης και καύσης, το σημείο ροής, η πυκνότητα, ο συντελεστής

θερμικής διαστολής ,η κινητική εσωτερική τριβή(ιξώδες) ,η ειδική θερμότητα και η θερμική αγωγιμότητα. [9]

1.4.1.1. Θερμική αγωγιμότητα

Η θερμική καταπόνηση των μονώσεων σχετίζεται με τα φαινόμενα τοπικής αύξησης του αριθμού των ελεύθερων ηλεκτρικών φορέων , σε θέσεις όπου η πεδιακή ένταση είναι αυξημένη. Κατά την λειτουργία των διαφόρων κατασκευών υπάρχει πάντα η θερμότητα για την εκδήλωση των διαταραχών .Οι θερμομονωτικές ιδιότητες είναι καλύτερες όταν ένα υλικό είναι καλός μονωτής. [9]

Θερμική αγωγιμότητα (K) ενός υλικού είναι το ποσό της θερμότητας που απάγεται στην μονάδα του χρόνου από μια μοναδιαία επιφάνεια του υλικού, όταν υπάρχει διαφορά ενός βαθμού θερμοκρασίας σε μοναδιαίο πάχος υλικού. Η θερμική αγωγιμότητα του μονωτικού λαδιού , έχει να κάνει με τη δυνατότητα απαγωγής της θερμότητας που αναπτύσσεται σε αυτό.

Η θερμική αγωγιμότητα του μονωτικού λαδιού πρέπει να είναι $3 - 4 * 10^{-4}$ cal/(cm · s °C) ανάλογα με την θερμοκρασία. Τα φυτικά έλαια τα οποία άγουν την θερμότητα πιο αποτελεσματικά έχουν υψηλότερη θερμική αγωγιμότητα.

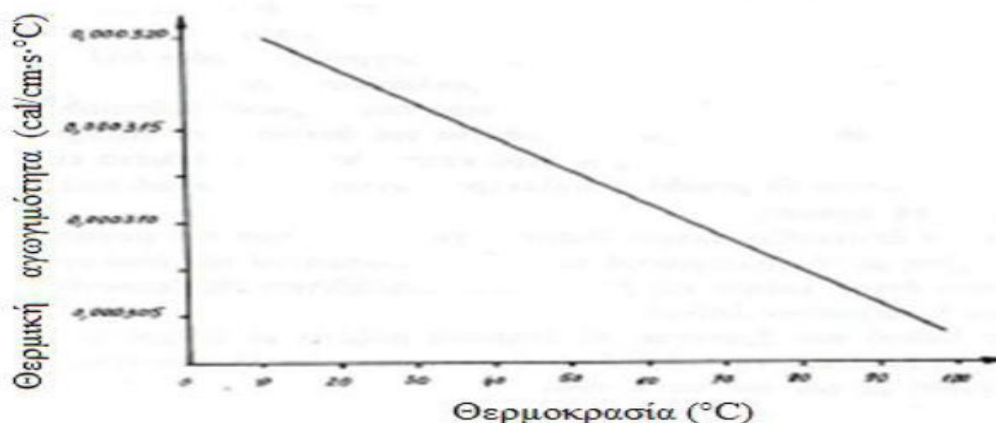
Η θερμική αγωγιμότητα εξαρτάται από την θερμοκρασία , το είδος των υδρογονανθράκων που περιέχει και το μοριακό βάρος του λαδιού. Συγκεκριμένα η θερμική αγωγιμότητα μειώνεται γραμμικά με την αύξηση της θερμοκρασίας και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση.

$$K_t = 0.00028 (1 - 0.0054 \cdot t) / d$$

Όπου K_t :ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας

d:η πυκνότητα g/ml στους 15 °C

t: η θερμοκρασία σε °C



Σχήμα 1.9 :Μεταβολή του συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας του μονωτικού λαδιού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. [10]

1.4.1.2 Ειδική θερμότητα

Η ειδική θερμότητα C του μονωτικού ελαίου σε μια δεδομένη θερμοκρασία και πίεση, είναι το ποσό ενέργειας (cal) που απαιτείται για να αυξηθεί μοναδιαία μάζα (1g) του λαδιού κατά ένα βαθμό θερμοκρασίας (°C). Η μεταβολή αυτή μπορεί να θεωρηθεί ότι γίνεται υπό σταθερή πίεση οπότε η ειδική θερμότητα συμβολίζεται ως C_p .Η ειδική θερμότητα του μονωτικού λαδιού χαρακτηρίζει την ικανότητά του να απορροφά θερμότητα και κατά συνέπεια την καταλληλότητα του ως ψυκτικό μέσο.

Η ειδική θερμότητα του μονωτικού ελαίου πρέπει να είναι μεταξύ 0,4 – 0,5 cal/(g·°C) ανάλογα με την θερμοκρασία του λαδιού.

Η ειδική θερμότητα του λαδιού αυξάνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του και είναι δυνατό να υπολογιστεί από τον τύπο

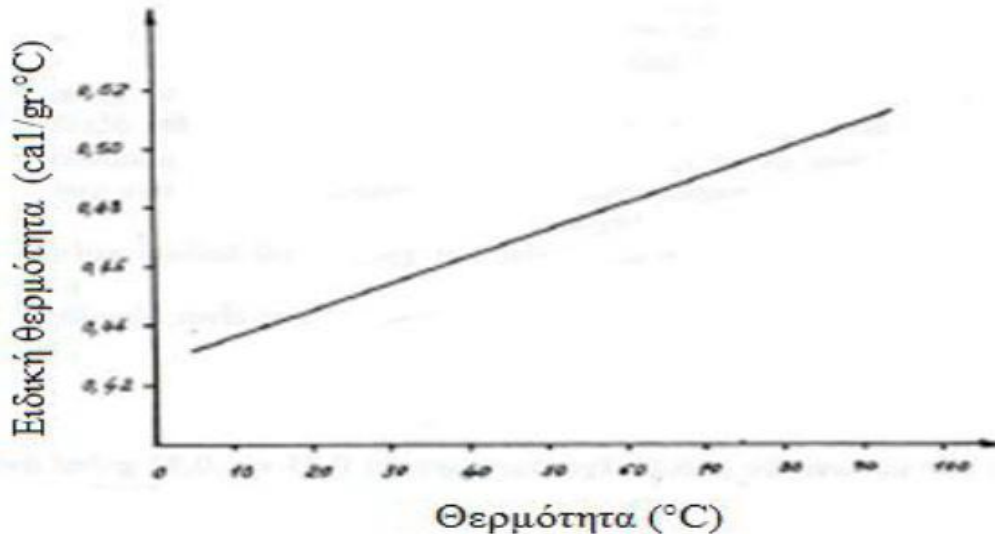
$$C_p = \frac{1}{\sqrt{d}} (0,42 + 0,00081 * t)$$

Όπου C_p : η ειδική θερμότητα με σταθερή πίεση cal/ (g·°C)

d: η πυκνότητα g/ml στους 15 °C

t: η θερμοκρασία σε °C

Το σχήμα που ακολουθεί παριστάνει τη μεταβολή της ειδικής θερμότητας του λαδιού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία



Σχήμα 1.10 :Μεταβολή της ειδικής θερμότητας του μονωτικού λαδιού σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία του.[10]

1.4.1.3 Πυκνότητα

Η πυκνότητα του μονωτικού ελαίου πρέπει να είναι 0,85-0,92 g/ml ανάλογα με την προέλευση του σε θερμοκρασία 20 °C. Οι παραφινικοί υδρογονάνθρακες έχουν μικρότερη πυκνότητα από τους αρωματικούς.

Η αύξηση της πυκνότητας του μονωτικού λαδιού μετασχηματιστή μπορεί να οφείλεται στα παραπροϊόντα αποικοδόμησης, στον όγκο του ελαίου, δηλαδή στη χημική αποσύνδεση του μονωτικού χαρτιού, στα παραγόμενα ιόντα χαλκού ή στις ελεύθερες ρίζες διασπασμένων αλυσίδων υδρογονανθράκων. Επίσης η πυκνότητα του μονωτικού λαδιού μειώνεται με αύξηση της θερμοκρασίας του μονωτικού λαδιού. Λόγω της αυξομείωσης της πυκνότητας ο όγκος του λαδιού αυξομειώνεται.

Η μεταβολή της πυκνότητας με τη θερμοκρασία αναφοράς t_0 ακολουθεί με πολύ μεγάλη προσέγγιση τον τύπο :

$$d_t = d_0 / (1 + \alpha * t)$$

Όπου d_t : η πυκνότητα σε θερμοκρασία $t+t_0$

d_0 : η πυκνότητα στη θερμοκρασία αναφοράς

t: η διαφορά θερμοκρασίας από την t_0

$$\alpha = 75 * 10^{-5}$$

Αύξηση της θερμοκρασίας συνεπάγεται μείωση της πυκνότητας του λαδιού και αύξηση του όγκου του λαδιού σύμφωνα με την σχέση $m=p/v$, όπου η μάζα παραμένει σταθερή. Αντίθετα μείωση της θερμοκρασίας συνεπάγεται αύξηση της πυκνότητας και μείωση του όγκου του λαδιού.

Γι αυτό το λόγο υπάρχει στο μετασχηματιστή το δοχείο διαστολής το οποίο δέχεται αυτήν την αυξομείωση του όγκου του μονωτικού λαδιού.

Όσον αφορά τους φυτικούς εστέρες έχει παρατηρηθεί ότι η προσθήκη του εστέρα στο ορυκτέλαιο αύξησε τη συνολική πυκνότητα , καθώς ο εστέρας έχει υψηλότερη πυκνότητα από το ορυκτέλαιο. [9]

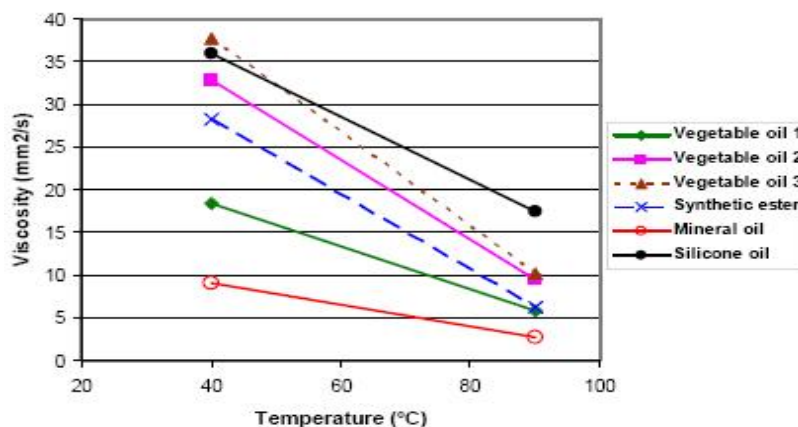
1.4.1.4 Κινητική εσωτερική τριβή (ιξώδες)

Με τον όρο ιξώδες περιγράφεται η εσωτερική αντίσταση ενός υγρού κατά την ροή του. Το ιξώδες ενός μονωτικού υγρού είναι σημαντικό για τον διασκεδασμό της θερμότητας και τη διαδικασία διαπότισης. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του ιξώδους για ένα υγρό τόσο πιο εύκολα αυτό ρέει .Γι αυτό τον λόγο προτιμάμε μονωτικά λάδια με χαμηλές τιμές ιξώδους έτσι ώστε να μπορούν να κυκλοφορούν καλύτερα ανάμεσα στα στοιχεία του μετασχηματιστή και να απάγουν την θερμότητα του πυρήνα και των τυλιγμάτων πιο αποτελεσματικά.

Η τιμή του ιξώδους ενός λαδιού αυξάνεται όσο αυτό βρίσκεται σε λειτουργία επειδή μπορεί να έχει μολυνθεί με ακαθαρσίες .Το ιξώδες ενός μίγματος αυξάνεται με το αυξανόμενο μοριακό μέγεθος και μοριακό βάρος των συστατικών ενώσεων. Επίσης το ιξώδες μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και τότε το λάδι μπορεί να ρέει ευκολότερα ανάμεσα στα τυλίγματα του μετασχηματιστή και να απάγει την θερμοκρασία που αναπτύσσεται από αυτόν προς το περιβάλλον.

Το ιξώδες του ορυκτέλαιου είναι πολύ χαμηλό έναντι αυτού του υγρού εστέρα.

Συνεπώς το ορυκτό λάδι είναι πιο αποτελεσματικό για την ψύξη των μετασχηματιστών . Με τη μίξη των δύο υγρών , μια αύξηση στο ιξώδες λόγω του ποσοστού του υγρού εστέρα αναμένεται.



Σχήμα 1.11: Μεταβολή ιξώδους σε σχέση με τη θερμοκρασία για διάφορους τύπους υγρών σύμφωνα με την προδιαγραφή ISO 3104.

[11]

1.4.1.5 Σημείο ροής

Το σημείο ροής ενός υγρού είναι πιο χαμηλή θερμοκρασία στην οποία το υγρό αρχίζει να ρέει μετά από ψύξη που έγινε με προκαθορισμένες συνθήκες. Το σημείο ροής ενός μονωτικού ρευστού είναι σημαντικό επειδή δείχνει τη θερμοκρασία κάτω από την οποία η κυκλοφορία του ελαίου μπορεί να είναι δύσκολη. Το σημείο ροής αποτελεί χαρακτηριστικό του

μονωτικού λαδιού και καθορίζεται από τον τρόπο παραγωγής του. Ένα χαμηλό σημείο ροής είναι σημαντικό ιδιαίτερα σε ψυχρά κλίματα για να διασφαλιστεί ότι το έλαιο θα κυκλοφορήσει και θα εξυπηρετήσει το σκοπό του ως μονωτικό και ψυκτικό μέσο. Οι κανονισμοί προβλέπουν ότι τα μονωτικά λάδια πρέπει να διατηρούν τη ρευστότητά τους μέχρι $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Οι τιμές του σημείου ροής των φυσικών εστέρων είναι πολύ πιο υψηλές απ' αυτές των τυπικών ορυκτέλαιων, [9]

1.4.1.6 Συντελεστής θερμικής διαστολής

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής του λαδιού είναι η αύξηση της μονάδας του όγκου για αύξηση της θερμοκρασίας κατά 1°C και πρέπει να είναι $0,7-0,8 \cdot 10^{-3} /^{\circ}\text{C}$. Πρέπει να είναι γνωστός με ακρίβεια για τον υπολογισμό του δοχείου διαστολής. Υπολογίζεται από την σχέση

$$\sigma.θ.δ. = (S_1 - S_2) / [S_1(T_2 - T_1)]$$

Όπου $\sigma.θ.δ.$ ο συντελεστής θερμικής διαστολής, S_1 το ειδικό βάρος σε θερμοκρασία T_1 και S_2 το ειδικό βάρος σε θερμοκρασία T_2

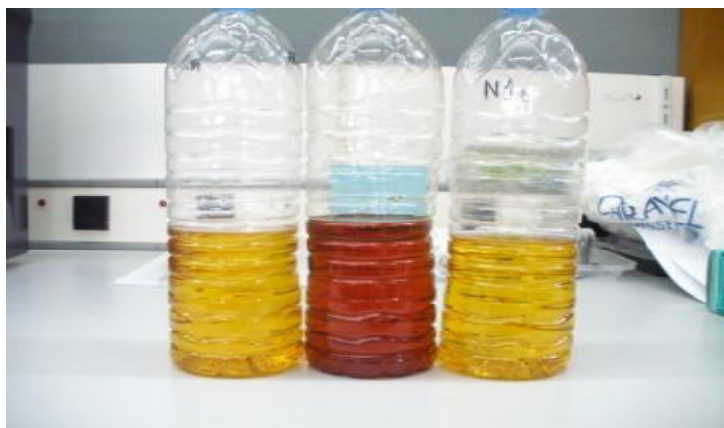
1.4.1.7 Χρώμα

Το μονωτικό λάδι πρέπει να είναι όσο το δυνατόν όσο πιο καθαρό και ανοιχτόχρωμο. Το χρώμα του μονωτικού λαδιού ορυκτέλαιο πρέπει να είναι κίτρινο ανοιχτό και η διαφορά από λάδι σε λάδι μικρή. Αντίθετα με τα ορυκτέλαια τα φυτικά έλαια έχουν χρώμα ανοιχτό πράσινο. Γενικά τα ρευστά νέου φυσικού εστέρα μπορούν αρχικά να είναι ελαφρώς σκουρότερα στο χρώμα, από το καθαρισμένο νέο ορυκτέλαιο.

Το χρώμα του λαδιού είναι στοιχείο για να εκτιμηθεί η κατάσταση του. Κάθε μεταβολή του χρώματος κατά την διάρκεια το χρόνου υποδηλώνει υποβάθμιση ή ρύπανση του μονωτικού λαδιού. Η μεταβολή του χρώματος του λαδιού που χρησιμοποιείτε πιθανόν σημαίνει οξείδωση ή παρουσία ξένων σωματιδίων μέσα σε αυτό. [9]



Σχήμα 1..12 Χρώμα ελαίου φυτικής προέλευσης. Envirotemp® FR3™.



Σχήμα 1.13 Τύποι ορυκτέλαιου στη παλαιότητα ,τη χρήση ,το χρώμα και τη μονωτική του ικανότητα. Εμφανής είναι η διαφορά τους στο χρώμα σε σύγκριση με το έλαιο φυτικής προέλευσης. [9]

1.4.1.8 Καθαρότητα

Το μονωτικό λάδι πρέπει να είναι διαυγές ,να μην περιέχει αιωρούμενα ξένα σωματίδια (σκόνη ,ίνες) ,να μην έχει βλαβερές προσμίξεις , όπως αλκάλια , οξέα ή ελεύθερο θείο. Μπορούμε να προσδιορίσουμε αν υπάρχουν ξένα σωματίδια και νερό στο λάδι με τον έλεγχο της διηλεκτρικής τους εντολής.

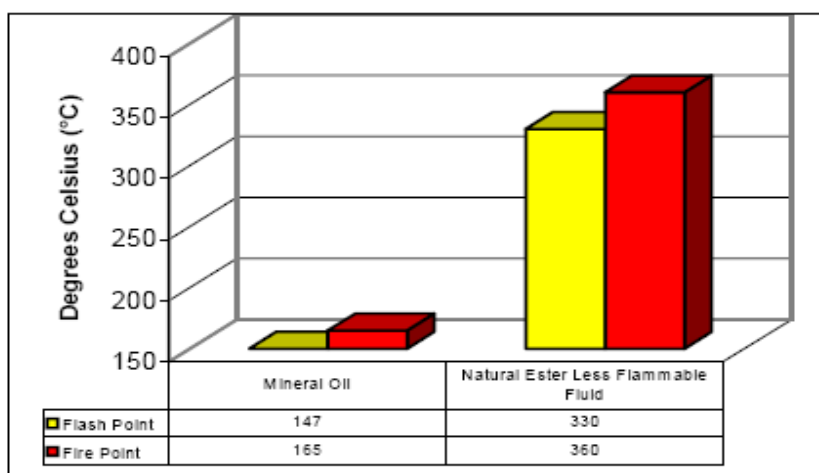
Τα ξένα σωματίδια στο λάδι μειώνουν τις αποστάσεις μόνωσης γιατί σχηματίζουν αγώγιμες γέφυρες με αποτέλεσμα τη μείωση της τάσης διάσπασης .Επίσης υπάρχουν μέθοδοι που αποσκοπούν στην ανίχνευση θείου στα μονωτικά λάδια βασιζόμενες στην ιδιότητα του να προκαλεί διάβρωση στο γυμνό χαλκό. Η καταστροφή που θα προκαλέσει το θείο στα μέταλλα εξαρτάται από την ποσότητα του , την θερμοκρασία και το χρόνο. [9]

1.4.1.9 Σημεία ανάφλεξης και καύσεως

Το σημείο ανάφλεξης είναι η ελάχιστη θερμοκρασία στην οποία κάτω από ορισμένες συνθήκες το λάδι αναδίδει ατμούς , που με τον ατμοσφαιρικό αέρα δημιουργούν εύφλεκτο μίγμα και αναφλέγεται με σπινθήρα.

Το σημείο ανάφλεξης προσδιορίζεται πειραματικά από τη θέρμανση του λαδιού μέσα σε κλειστό δοχείο η σε ανοιχτό δοχείο. Το σημείο καύσης προσδιορίζεται με την βοήθεια ανοιχτού δοχείου. Το χρησιμοποιούμενο λάδι δεν πρέπει να έχει χαμηλό σημείο ανάφλεξης και συγκεκριμένα κάτω από 160° C. Οι φυσικοί εστέρες έχουν υψηλότερα σημεία ανάφλεξης και καύσης από τα ορυκτέλαια και άλλα διηλεκτρικά υγρά και ξεπερνούν τους 300° C το σημείο ανάφλεξης και τους 350° C το σημείο καύσης. Σύμφωνα με το πρότυπο IEC 61100 κατατάσσονται στην κατηγορία K. Επομένως , ενδείκνυται η χρήση τους σε εφαρμογές όπου ο κίνδυνος ανάφλεξης επιβάλλει περιορισμούς.

Πρόσφατες μελέτες έδειξαν ότι ένα ποσοστό μετασχηματιστών θα αποτύχει. Η χρήση των φυτικών ελαίων εξασφαλίζει ότι οι συνέπειες αυτού του επεισοδίου δεν θα είναι καταστροφικές για τις γειτονικές εγκαταστάσεις καθώς έχει αποδειχθεί με αρκετά πειράματα ότι η στιγμιαία ανάφλεξη των φυτικών ελαίων δεν οδηγεί σε παρατεταμένη φωτιά. Τα φυτικά έλαια έχουν την ιδιότητα της αυτοκατάσβεσης προφυλάσσοντας τον υπόλοιπο εξοπλισμό μιας εγκατάστασης. Επομένως η χρήση των λιγότερο εύφλεκτων φυτικών ελαίων , οδηγεί σε μείωση του συνολικού κόστους εγκατάστασης , αφού καταργεί την ανάγκη παρουσίας συστημάτων κατάσβεσης.



Σχ. 1.14 Σημεία ανάφλεξης και καύσης για ορυκτό και φυτικό έλαιο μετασχηματιστή. [9]

1.4.1.10 Επιφανειακή τάση

Στο εσωτερικό της μάζας οποιουδήποτε υγρού, κάθε μόριο περιβάλλεται από άλλα μόρια και υπάρχουν δυνάμεις έλξης ομοιόμορφα προς όλες τις διευθύνσεις. Οι δυνάμεις είναι γνωστές σαν δυνάμεις συνοχής. Επειδή υπάρχουν δυνάμεις συνοχής, η εξωτερική επιφάνεια του λαδιού συμπεριφέρεται σαν ελαστική μεμβράνη που τεντώνεται προς όλες τις διευθύνσεις. Η τάση αυτή του επιφανειακού στρώματος λέγεται επιφανειακή τάση. Η επιφανειακή τάση αποτελεί μοριακή ιδιότητα και μετριέται σε dyn/cm .

Τα σωματίδια που υπάρχουν ή δημιουργούνται στο μονωτικό έλαιο τείνουν να συγκεντρωθούν στην επιφάνεια που διαχωρίζει αυτό από το αποσταγμένο νερό. Η συγκέντρωση αυτή έχει ως αποτέλεσμα την μείωση της επιφανειακής τάσης.

Η επιφανειακή τάση είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας, μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία και μηδενίζεται στο κρίσιμο σημείο.

Η επιφανειακή τάση μπορεί να μην έχει τόσο μεγάλη εφαρμογή για τους φυσικούς εστέρες όπως στα πετρελαιοειδή. Λόγω της υψηλής υδρόφιλης φύσης του υγρού εστέρα η επιφανειακή τάση δεν είναι πολύ ευαίσθητη στις αλλαγές στην ποιότητα του ελαίου. [9]

1.4.2 Χημικές Ιδιότητες

Στις χημικές ιδιότητες περιλαμβάνονται ιδιότητες όπως η οξείδωση, η οξύτητα, ο βαθμός εξουδετέρωσης, η αλκαλικότητα, η υγρασία, η απορρόφηση και έκλυση αερίων.

1.4.2.1 Οξείδωση

Οξείδωση επέρχεται σε μια συσκευή κατά την ατμοσφαιρική αναπνοή. Ο φυσικός εστέρας έχει χαμηλότερη σταθερότητα στην οξείδωση από το ορυκτέλαιο.

Εντούτοις, ανάλογα με τον τύπο και την παρουσία ή την έλλειψη ανασταλτικού παράγοντα, η συμπεριφορά οξείδωσης των φυτικών ελαίων μπορεί να είναι πολύ διαφορετική.

Παραπροϊόντα της χημικής αποσύνθεσης του λαδιού λόγω της οξείδωσης είναι οξέα, αλδεΐδες, κετόνες, νερό το οποίο παραμένει στο λάδι και μειώνει την διηλεκτρική του αντοχή κτλ. Τα προϊόντα της οξείδωσης στο ορυκτό έλαιο μπορεί να αντιδρούν για να σχηματίσουν ιζήματα λάσπης, τα οποία φράζουν τους σχετούς κυκλοφορίας του ελαίου και παρεμποδίζουν την ψύξη της συσκευής. Τα ενδιάμεσα προϊόντα οξειδώσεως που παράγονται προσβάλλουν επίσης τα στέρεα μονωτικά, όπως το χαρτί και μειώνουν την μηχανική τους αντοχή.

Με την χρήση αντιοξειδωτικών πρόσθετων μπορεί να αναβληθεί η οξείδωση στο ορυκτέλαιο. Τέτοιες ουσίες είναι χημικές ενώσεις με βάση φαινόλες, αμίνες κλπ. Επομένως, τα ανασταλτικά οξείδωσης επιταχύνουν την ωφέλιμη διάρκεια ζωής του λαδιού.

Αντίθετα με τα ορυκτέλαια, τα προϊόντα οξείδωσης των φυτικών ελαίων δεν σχηματίζουν ιζήματα λάσπης, αλλά το λάδι αρχίζει να πυκνώνει και τελικά γίνεται πολυμερισμός. Στα πρώτα στάδια της οξείδωσης του φυτικού ελαίου παρατηρείται αύξηση του ιξώδους, Η UV έκθεση των φυτικών ελαίων επίσης επιταχύνει τον πολυμερισμό. Έτσι, τα φυτικά έλαια είναι σχεδόν βέβαιο ότι δεν είναι κατάλληλα για χρήση σε μετασχηματιστές ελεύθερης αναπνοής εξαιτίας των ενδεχόμενων αλλαγών του ιξώδους και πρέπει να απομονωθούν από την άμεση ατμοσφαιρική επαφή.

Η παρουσία χαλκού ενισχύει την τάση για οξείδωση στους μετασχηματιστές. Ο συνυπολογισμός του χαλκού αυξάνει το ποσοστό όξινης παραγωγής στο ορυκτέλαιο, εντούτοις μείωσε το ποσοστό όξινης παραγωγής στο φυσικό εστέρα. Ο χαλκός δεν έχει επιπτώσεις στο συνθετικό εστέρα, καταδεικνύοντας την καλή χημική σταθερότητα. Τελικά, η οξείδωση είναι μια ανησυχία, τόσο για τα ορυκτά έλαια όσο και για τα φυτικά, αλλά για διαφορετικούς λόγους. [9]

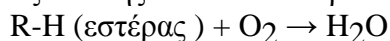
Επιβραδυντές οξείδωσης

Για να βελτιωθεί η σταθερότητα των λαδιών απέναντι στην οξείδωση χρησιμοποιούνται διάφορες χημικές ενώσεις, τα αντιοξειδωτικά πρόσθετα. Ο μετασχηματιστής πρέπει να είναι απαλλαγμένος από την υγρασία και το οξυγόνο. Η υγρασία καταστρέφει την κυτταρίνη σε ακόμα μεγαλύτερο βαθμό όταν υπάρχει οξυγόνο. Επίσης τα οξέα που σχηματίζονται λόγω οξείδωσης χειροτερεύουν την μόνωση και τα διάφορα μέταλλα, παράγοντας ακόμα περισσότερα οξέα και ιζήματα λάσπης. Η αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος αντιμετωπίζεται με την προσθήκη αντιοξειδωτικών όπου αυτά είναι ουσίες που προστίθενται στο λάδι. Τα ευρύτερα διαδεδομένα αντιοξειδωτικά μέσα είναι η δι-τριτογενής βουτυλική φαινόλη (DBP) και η δι-τριτογενής βουτυλική παρακρεσόλη (DBPC). Η απαιτούμενη ποσότητα είναι 0,3% του συνολικού βάρους του λαδιού και καθορίζεται από την προδιαγραφή ASTM D3487. Ο υπολογισμός της υπολειπόμενης ποσότητας γίνεται βάση του προτύπου ASTM D4768-03. Η περιεκτικότητα του αντιοξειδωτικού ελέγχεται κάθε 3-5 χρόνια. [9]

1.4.2.2 Οξύτητα

Η καλή υγρή μόνωση είναι χημικά ουδέτερη. Η ύπαρξη επομένως οξέων στα λάδια είναι ανεπιθύμητη. Τα οξέα μπορούν να προκύψουν στα μονωτικά υγρά κατά την διάρκεια της επεξεργασίας ή της λειτουργίας. Αυτά προκαλούν διαβρώσεις των μεταλλικών στοιχείων και μειώνουν την διηλεκτρική αντοχή των λαδιών. Το υπερβολικό περιεχόμενο οξέος δεν είναι ανεκτό.

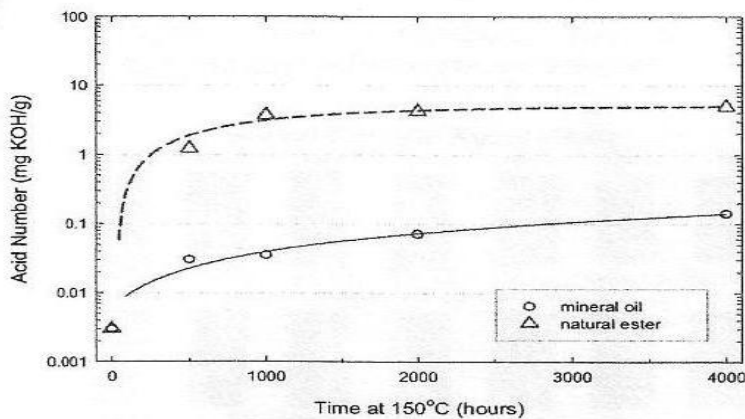
Ο αριθμός οξύτητας είναι το ποσό των χιλιοστών του γραμμαρίου (mg) του υδροξειδίου (KOH) που απαιτείται για να εξουδετερωθούν τα ελεύθερα οξέα που περιέχονται σε δείγμα ελαίου ενός γραμμαρίου. Η οξύτητα αυξάνεται με την περιεκτικότητα σε εστέρα. Σε κανονικές συνθήκες η οξύτητα του εστέρα είναι υψηλότερη από του ορυκτέλαιου. Η αύξηση της οξύτητας του μίγματος με περιεχόμενο εστέρα οφείλεται στην υψηλή οξύτητα του εστέρα. Το υψηλότερο περιεχόμενο του φυσικού εστέρα στο μίγμα συμβάλλει σε υψηλότερο οξύ στο μίγμα ορυκτέλαιου-εστέρα. Το οξύ στον εστέρα μπορεί να προκύψει ως αποτέλεσμα της οξείδωσης που απελευθερώνει οξύ και νερό σύμφωνα με την εξίσωση[9]:



1.4.2.3 Βαθμός εξουδετέρωσης

Ο βαθμός εξουδετέρωσης αποτελεί μέτρο της οξύτητας του λαδιού. Μαζί με την επιφανειακή τάση δείχνει εάν το μονωτικό λάδι χρειάζεται αναγέννηση. Η εύρεση του βαθμού εξουδετέρωσης, υποδηλώνει τον αριθμό των mg KOH που απαιτούνται για να ουδετεροποιήσουν ένα γραμμάριο ηλεκτρομονωτικού ελαίου. Η οξύτητα εξαρτάται από τα παραπροϊόντα γήρανσης, όπως και από τις συγκεντρώσεις των πρόσθετων ουσιών, όπως η πιθανή συγκέντρωση PCBs στο σώμα του ελαίου με τιμή μεγαλύτερη των 50 ppm. Η οξύτητα, που μετράται στα μονωτικά έλαια αποτελείται μόνο από την οργανική οξύτητα, γιατί η ανόργανη είναι αμελητέα. Έχει σημασία η παρακολούθηση της οξύτητας του ελαίου, γιατί η αύξηση της οξείδωσης τους έχει σαν αποτέλεσμα και την αύξηση της οξύτητας του. Τιμές μεγαλύτερες από 0,3 υποδηλώνουν την παρουσία οργανικών οξέων τα οποία είναι επιβλαβή για το μονωτικό σύστημα. Τα οξέα ενδέχεται να δημιουργούν διάβρωση, αυξάνουν τη διαλυτότητα του νερού στο λάδι και δρουν καταλυτικώς στην διαδικασία αποσύνθεσης του χαρτιού.

Σε πείραμα εργαστηριακής γήρανσης έχει παρατηρηθεί ότι η διαδικασία της υδρόλυσης και η δημιουργία των αλυσίδων λιπαρών οξέων αυξάνουν σημαντικά τον βαθμό εξουδετέρωσης ακόμα και του φυτικού ελαίου.

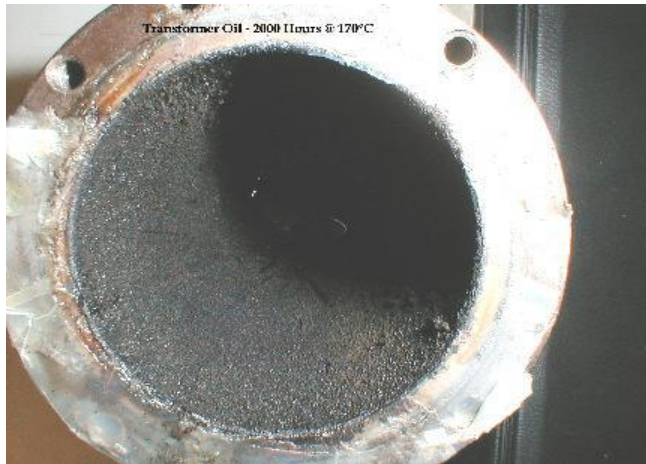


Σχ. 1.15 Βαθμός εξουδετέρωσης σε συνάρτηση με τον χρόνο στους 150 °C[12]

Παρόλη την αύξηση όμως του βαθμού εξουδετέρωσης, το εσωτερικό του δοκιμαστικού σωλήνα διατηρήθηκε σε άριστη κατάσταση, αποδεικνύοντας στην πράξη ότι τα οξέα που δημιουργούνται κατά την υπερθέρμανση των φυτικών ελαίων είναι ασθενή. Αντιθέτως, οι δοκιμαστικοί σωλήνες που παρείχαν ορυκτέλαιο παρουσίασαν εκτεταμένη διάβρωση.



Σχ. 1.16 Φυτικό έλαιο



Σχ. 1.17 Ορυκτέλαιο

Ο χαλύβδινος κύλινδρος που περιέχει το φυσικό εστέρα (α) ήταν καθαρός με λίγο αποχρωματισμό. Ο κύλινδρος που περιέχει το ορυκτό έλαιο (β) ήταν τελείως επιχρισμένος με λάσπη από ορυκτέλαιο
[12]

1.4.2.4 Αλκαλικότητα ή βαθμός σαπωνοποίησης

Στα καινούργια λάδια η αλκαλικότητα πρέπει να είναι αμελητέα. Ύπαρξη όμως σημαντικής αλκαλικότητας σημαίνει μόλυνση του λαδιού και μειώνει την διηλεκτρική του αντοχή.

Μέτρο της αλκαλικότητας του λαδιού είναι ο βαθμός σαπωνοποίησης όπου είναι το ποσό των mg KOH που χρειάζονται για την πλήρη σαπωνοποίηση 1g λαδιού. Ο βαθμός αυτός πρέπει να είναι 0,3-0,6 mg KOH/g και όταν φτάσει το 1,5 mg KOH/g επιβάλλεται η αντικατάσταση του λαδιού. [9]

1.4.2.5 Υγρασία (Περιεκτικότητα σε νερό)

Η σχετική υγρασία ενός υγρού είναι η περιεκτικότητα σε διαλυμένο νερό του υγρού σχετικά με τη μέγιστη χωρητικότητα υγρασίας που μπορεί να κρατήσει στη συγκεκριμένη θερμοκρασία. Η σχετική υγρασία σε μια δεδομένη απόλυτη θερμοκρασία καθορίζεται ως το πηλίκο της περιεκτικότητας σε νερό στο υγρό προς το όριο κορεσμού του νερού στο λάδι. Το όριο κορεσμού ενός μονωτικού υγρού εξαρτάται από τον τύπο μόνωσης του υγρού, τη χημική του σύνθεση, το μέσο μοριακό βάρος του και τη θερμοκρασία.

Η σχετική περιεκτικότητα σε νερό w_{rel} (%) καθορίζεται από τη σχέση

$$W_{rel} = (W_{abs}) / [W_L(T)]$$

Όπου W_L είναι η περιεκτικότητα κορεσμού σε νερό και W_{abs} (ppm) είναι η περιεκτικότητα σε νερό.

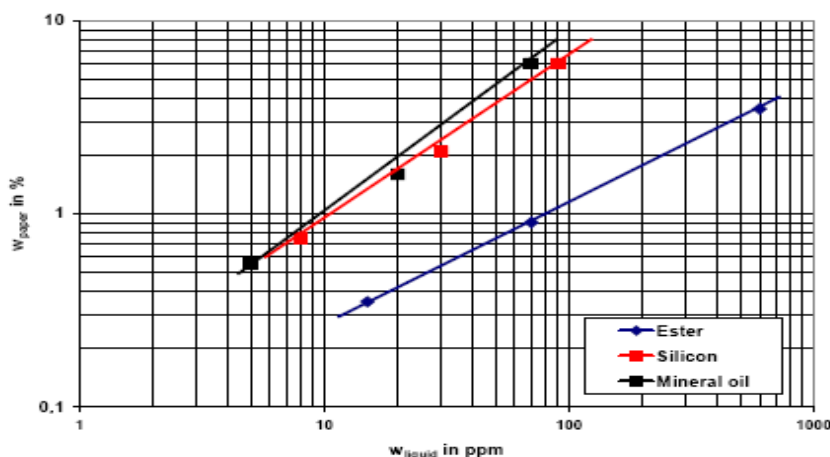
Οι ηλεκτρικές παράμετροι της μόνωσης είναι έντονα επηρεασμένες από την περιεκτικότητα σε νερό, και ένα επίπεδο υψηλής υγρασίας μειώνει την λειτουργική ασφάλεια. Η τάση διάσπασης και η διηλεκτρική αντοχή ενός ελαίου επηρεάζονται αρνητικά από την παρουσία νερού. Η αύξηση της σχετικής περιεκτικότητας σε νερό μειώνει την τιμή της τάσης διάσπασης. Η παρουσία υγρασίας στο μονωτικό λάδι αποτελεί σημαντικό παράγοντα της μονωτικής του υποβάθμισης καθώς σχηματίζει αγωγίμες γέφυρες που μπορούν να επιφέρουν την διάσπαση του. Επομένως η υγρασία προκαλεί δραστηκή μείωση στην διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού λαδιού και αύξηση του συντελεστή απωλειών λόγω της αύξησης του ρεύματος απωλειών. Η υγρασία αυξάνει τον ηλεκτρικό παράγοντα αγωγιμότητας και διασκεδασμού και επιδεινώνει την διηλεκτρική αντοχή.

Η γήρανση του μονωτικού χαρτιού μειώνει το βαθμό πολυμερισμού του μονωτικού χαρτιού και κατά συνέπεια τη μηχανική του αντοχή μέχρι και το 20% της αρχικής τιμής. Η συμβολή της υγρασίας στη γήρανση του μονωτικού χαρτιού, αλλά και στην μείωση της διάρκειας ζωής του μετασχηματιστή, έγκειται στο γεγονός ότι μειώνει το βαθμό πολυμερισμού λόγω της υδρόλυσης που προκαλεί σε αυτό.

Το νερό διανέμεται ανάμεσα στο χαρτί και το λάδι ανάλογα με τη θερμοκρασία του συστήματος μόνωσης. Όσο η θερμοκρασία του συστήματος μόνωσης αυξάνεται νερό μετακινείται από το χαρτί στο λάδι ενώ όταν η θερμοκρασία του συστήματος μειώνεται νερό μετακινείται από το λάδι στο χαρτί. Τέτοιες μεταβολές στην περιεχόμενη στο λάδι υγρασία, ελάχιστα επηρεάζουν την περιεχόμενη στο χαρτί υγρασία, η οποία παραμένει σχεδόν σταθερή. Αυτό συμβαίνει διότι περισσότερο από

το 99% του συνολικού νερού του μονωτικού συστήματος του μετασχηματιστή , περιέχεται στο στέρεο μονωτικό δηλαδή στο χαρτί.

Το νερό στο υγρό εξισορροπείται με το νερό που διατηρείται στην μόνωση χαρτιού του μετασχηματιστή. Ο συσχετισμός της περιεκτικότητας σε υγρασία των μονωτικών υγρών και του εμποτισμένου χαρτιού παρουσιάζεται στο σχήμα παρακάτω για χαρτί κυτταρίνης που διαποτίζεται με ορυκτέλαιο, υγρό σιλικόνης και υγρό εστέρα.



Σχ.18 Ποσοστό υγρασίας για διάφορα υγρά στους 20°C [13]

Υπάρχουν δύο μηχανισμοί ώστε το έλαιο να αυξήσει στην περιεκτικότητα σε νερό σε έναν μετασχηματιστή. Ο πρώτος είναι μέσω της απορρόφησης από την ατμόσφαιρα και ο δεύτερος η γήρανση της μόνωσης κυτταρίνης που δημιουργεί νερό. Η θερμική καταπόνηση της μόνωσης εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας και η οξείδωση λόγω της παρουσίας οξυγόνου , έχουν ως αποτέλεσμα την δημιουργία κάποιων παραπροϊόντων με πιο σημαντικό απ' όλα το νερό. Επίσης η παρουσία νερού οφείλεται στη γήρανση του μονωτικού λαδιού. Αποτέλεσμα της επαφής του λαδιού με τον ατμοσφαιρικό αέρα είναι η οξείδωση που υφίσταται. Τα κυριότερα τελικά προϊόντα της οξείδωσης του λαδιού είναι διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Γι' αυτό το λόγο όσο περισσότερο διάστημα χρησιμοποιείται το μονωτικό λάδι σε ένα μετασχηματιστή τόσο μεγαλύτερη είναι η ποσότητα του νερού που βρίσκεται σε αυτό.

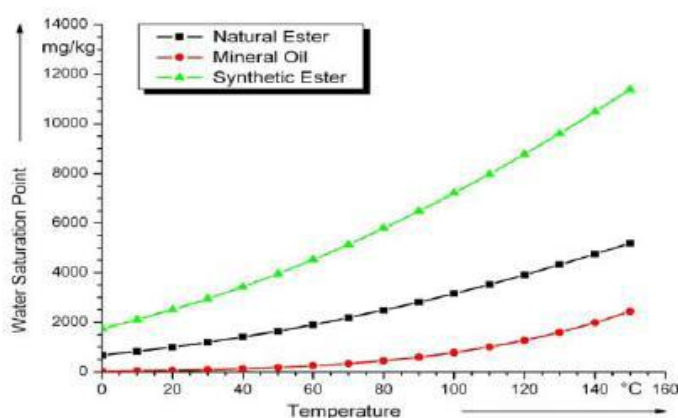
Η μέγιστη επιτρεπτή τιμή της περιεκτικότητας νερού στα χρησιμοποιούμενα ηλεκτρομονωτικά έλαια είναι τα 35 ppm για την περίπτωση ηλεκτρικών διατάξεων με ονομαστική τάση μέχρι και τα 69 kV, τα 25 ppm για ονομαστική τάση μέχρι 150 kV και τα 20 ppm για διατάξεις με ονομαστική τάση μέχρι τα 400 kV.

Η περιεκτικότητα σε νερό των υγρών φυσικών εστέρων μπορεί να διαφέρει σημαντικά του ορυκτού ελαίου. Δεδομένου ότι οι εστέρες είναι πολύ περισσότερο υδροσκοπικοί από το ορυκτέλαιο , η υγρασία ασκεί λιγότερη επίδραση στη διηλεκτρική αντοχή των εστέρων από το ορυκτέλαιο.

Η περιεκτικότητα σε υγρασία ενός διηλεκτρικού ρευστού πρέπει να παραμείνει αρκετά κάτω από τον κορεσμό για να αποτρέψει μείωση στην διηλεκτρική του αντοχή.

Ο φυσικός εστέρας έχει πολύ υψηλότερη περιεκτικότητα κορεσμού σε νερό από το ορυκτέλαιο. Επομένως ο εστέρας είναι σε θέση να διαλύσει πολύ περισσότερο νερό έναντι του ορυκτέλαιου προκειμένου να αποκτηθεί η ίδια σχετική περιεκτικότητα σε νερό. Κανονικά ο φυσικός εστέρας έχει χαμηλή σχετική περιεκτικότητα σε νερό. Αυτό είναι ένας λόγος για τον οποίο η τάση διάσπασης του φυσικού εστέρα είναι υψηλότερη από το ορυκτέλαιο.

Σε θερμοκρασία δωματίου ο κορεσμός του νερού του ορυκτού ελαίου είναι περίπου 60 mg/kg. Οι φυσικοί εστέρες έχουν κορεσμό σε θερμοκρασία δωματίου περίπου 1000 mg/kg. Η διηλεκτρική αντοχή ενός μονωτικού υγρού αρχίζει να μειώνεται όταν ο σχετικός κορεσμός αυξάνεται στο 40-50%. Χρησιμοποιώντας κορεσμό επί τοις εκατό αντί της απόλυτης υγρασίας επιτρέπει να γίνουν άμεσες συγκρίσεις μεταξύ των υγρών φυσικών εστέρων και των ορυκτών ελαίων. [9]



Σχ.1.19 Κορεσμός ύδατος σε σχέση με τη θερμοκρασία για υγρό φυσικού εστέρα , συμβατικό λάδι μετασχηματιστή και υγρό συνθετικού εστέρα

1.4.2.6 Έκλυση και απορρόφηση αερίων

Τα μονωτικά υγρά κατά τη λειτουργία των μετασχηματιστών υφίστανται χημικές μεταβολές , λόγω των θερμικών και ηλεκτρικών καταπονήσεων .Αποτέλεσμα αυτών των μεταβολών είναι η απορρόφηση και η έκλυση αερίων. Τα αέρια προκαλούν δυσλειτουργίες στο έλαιο μεταβάλλοντας τις ηλεκτρικές τους ιδιότητες. Οι φυσαλίδες αερίων μέσα στο λάδι ιονίζουν και δημιουργούν δρόμους για την διάσπαση των μονώσεων, Γι' αυτό οι συσκευές πρέπει να σχεδιάζονται με την ελάχιστη δυνατότητα σχηματισμού αερίων σε χαμηλή συνεχή τάση. Η απορρόφηση και έκλυση αερίων από το λάδι εξαρτάται από τη φύση και την προέλευση του λαδιού.

Η ξεχωριστή διαφορά στα προϊόντα αποσύνθεσης σε σύγκριση με τα ρευστά υδρογονάνθρακα είναι το μεγάλο ποσό CO και CO₂ που δημιουργούνται. Αυτό γίνεται επειδή αντίθετα από τα ρευστά υδρογονάνθρακα τα ρευστά εστέρα περιέχουν μια ομάδα καρβονύλιου – COO, η οποία αναλύεται για να δώσει CO και CO₂. Το υδρογόνο δεν πρέπει να σχηματιστεί κανονικά από τη θερμική αποσύνθεση, αλλά ορισμένα συστατικά θα μπορούσαν να παράγουν υδρογόνο .

Υπό συνθήκες σχηματισμού τόξου , τα παραχθέντα αέρια είναι κυρίως υδρογόνο και ασετυλίνη για το λάδι μετασχηματιστή βασισμένο σε ορυκτέλαιο αλλά για το φυτικό

έλαιο επιπλέον τα CO και CO₂ παράγονται επίσης σε μεγάλες ποσότητες λόγω της παρούσας ομάδας εστέρα. [9]

1.4.3 Ηλεκτρικές Ιδιότητες

Στα ηλεκτρικά χαρακτηριστικά περιλαμβάνονται η διηλεκτρική αντοχή, η ειδική αντίσταση ,η διηλεκτρική σταθερά ,ο συντελεστής ισχύος (απωλειών) και η ειδική αγωγιμότητα.

1.4.3.1 Ειδική αγωγιμότητα

Ειδική αγωγιμότητα είναι μέτρο της ευκολίας ή της δυσκολίας με την οποία άγεται ηλεκτρικό ρεύμα δια μέσου κάποιου υλικού ανεξάρτητα από τις διαστάσεις του. Συμβολίζεται συνήθως με σ . Η μονάδα μέτρησης της ειδικής αγωγιμότητας είναι το $(\Omega \cdot m^{-1})$. Η ειδική αγωγιμότητα ενός υλικού με ένα φορέα ελεύθερου φορτίου είναι το γινόμενο της πυκνότητας φορτίου στο υλικό επί την ειδική κινητικότητα του φορτίου μέσα στο υλικό. Η πυκνότητα φορτίου είναι το γινόμενο της συγκέντρωσης φορτίου επί το ηλεκτρικό φορτίο του κάθε φορέα .Η ειδική κινητικότητα είναι ο λόγος του γινομένου του ηλεκτρικού φορτίου του κάθε φορέα επί το μέσο χρόνο ολίσθησης του φορέα στο υλικό προς την ενεργό μάζα του κάθε φορέα. Τα ηλεκτρομονωτικά υλικά έχουν μία πολύ μικρή ειδική αγωγιμότητα που εξαρτάται γενικά από τις συνθήκες λειτουργίας τους (τιμή πεδιακής έντασης, θερμοκρασία, υγρασία κ.α.) και έχει τιμή μεγαλύτερη από $10^{-10}[\Omega cm]^{-1}$. Η ειδική αγωγιμότητα είναι ένα πολύ σημαντικό κριτήριο αξιολόγησης των μονωτικών υλικών , γιατί εκφράζει τους ελεύθερους ηλεκτρικούς φορείς.

Η ειδική αγωγιμότητα αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Αυτό συμβαίνει γιατί αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει την κινητικότητα των ηλεκτρονίων και συνεπώς αυξάνεται το ηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το μονωτικό λάδι. Υποβαθμίζεται έτσι η μονωτική λειτουργία του λαδιού. [9]

1.4.3.2 Συντελεστής απωλειών

Ο συντελεστής απωλειών αναπαριστά τις διηλεκτρικές απώλειες του λαδιού, λόγω του ρεύματος διαρροής δια μέσου αυτού . Με τη μέτρηση του συντελεστή απωλειών ($\tan\delta$) εκτιμάται το ρεύμα διαρροής δια μέσου του λαδιού. Το ρεύμα διαρροής είναι το μέτρο της μόλυνσης που δίνει την κατάσταση των μονωτικών του ιδιοτήτων. Υψηλή τιμή του συντελεστή απωλειών είναι ένδειξη μόλυνσης ή ύπαρξης προϊόντων υποβάθμισης όπως νερό , άνθρακας, μεταλλικοί σάπωνες και προϊόντα οξειδωσης.

Σε μια μόνωση υπάρχουν πάντοτε απώλειες ενέργειας ,οι οποίες υπό εναλλασσόμενη τάση οφείλονται :

-στην κατανάλωση ενέργειας κατά τη διαρκή εναλλαγή της φοράς της ηλεκτρικής εναλλαγής των δίπολων στο ρυθμό εναλλαγής της πολικότητας της εναλλασσόμενης τάσης.

-στην πολύ μικρή ειδική αγωγιμότητα που έχουν τα μονωτικά υλικά.

Ο ιδανικός μονωτής είναι ένα ομοιογενές υλικό που δεν έχει απώλειες , Η γωνία μεταξύ τάσης και ρεύματος είναι 90 ,πράγμα που σημαίνει μηδενικές απώλειες αφού $\cos 90 = 0$. Το ισοδύναμο κύκλωμα του ιδανικού μονωτή είναι μια χωρητικότητα C.

Πρακτικά όμως δεν υπάρχει ιδανικός μονωτής με μηδενικές απώλειες. Το μονωτικό υλικό έχει έστω ένα ελάχιστο ρεύμα διαρροής , λόγω της αγωγιμότητας του. Η διαφορά φάσης μεταξύ της τάσης και του ρεύματος αποκλίνει από τις 90 και δ. Αυτή

η γωνία δ λέγεται γωνία απωλειών και το $\sin\delta$ λέγεται συντελεστής απωλειών γιατί η ισχύς που διαχέεται στο διηλεκτρικό είναι : $P=V \cdot I \cdot \cos(90-\delta)=V \cdot I \cdot \sin\delta$
Επειδή η δ είναι πολύ μικρή ισχύει $\sin\delta=\tan\delta$

Ο συντελεστής απωλειών δίνεται από την σχέση : $\tan\delta = I_R \div I_C = G \div \omega C$

1.4.3.3 Ειδική αντίσταση

Η ειδική αντίσταση (ρ) είναι το αντίστροφο μέγεθος της ειδικής αγωγιμότητας (σ) όπως φαίνεται από τον τύπο $\rho=1/\sigma$

Μεγάλη ειδική αντίσταση σημαίνει μικρή περιεκτικότητα ελεύθερων ιόντων και σωματιδίων που σχηματίζουν ιόντα ,σημαίνει δηλαδή μικρή αγωγιμότητα που είναι επιθυμητή στα μονωτικά υλικά.

Η ειδική αντίσταση του λαδιού ελαττώνεται όταν αυξάνεται η θερμοκρασία του. Επίσης ελαττώνεται όταν μέσα στο λάδι υπάρχουν ξένα σωματίδια και προϊόντα αποσυνθέσεως του λαδιού που οφείλονται στην οξείδωση του. Σημαντική ελάττωση της ειδικής αντίστασης έχουμε όταν υπάρχει αδιάλυτο νερό στο λάδι έστω και σε μικρές ποσότητες .

Η μέτρηση του μεγέθους αυτού που πρέπει να είναι $5 \cdot 10^{11}$ - $5 \cdot 10^{10} \Omega \cdot m$, είναι ένα κριτήριο σχετικά με την κατάσταση του λαδιού. [9]

1.4.3.4 Σχετική διηλεκτρική σταθερά

Η σχετική διηλεκτρική σταθερά $\epsilon_r(>1)$ είναι ένας συντελεστής η τιμή του οποίου διαφέρει σε κάθε είδος μονωτικού και εξαρτάται από την στατιστικότητα των ανομοιογενειών στο υλικό. Η σχετική διηλεκτρική σταθερά δίνει το πόσο μεγαλύτερη είναι η χωρητικότητα μιας διάταξης συγκριτικά με εκείνη στο κενό ή στον αέρα. Είναι ο λόγος της ειδικής αγωγιμότητας του λαδιού προς την ειδική αγωγιμότητα του κενού κάτω από τις ίδιες συνθήκες.

Οι σχετικές διηλεκτρικές σταθερές διαφόρων μονωτικών που συνθέτουν μια μόνωση θα πρέπει να επιλέγονται κατά τρόπο ώστε να εξομαλύνεται το πεδίο στις διαχωριστικές επιφάνειες τους, για να μην διευκολύνεται η εκδήλωση μερικών εκκενώσεων .

Η διηλεκτρική σταθερά επηρεάζεται ελάχιστα από την αύξηση της θερμοκρασίας στα καθαρά λάδια και παρατηρείται αύξηση διηλεκτρικής σταθεράς ελαφρώς με την περιεκτικότητα σε εστέρα. Ο φυσικός εστέρας περιέχει υψηλότερο ποσοστό σε νερό έναντι του ορυκτέλαιου. Εντούτοις , η διαλυτότητα του νερού του εστέρα είναι πολύ υψηλότερη από του ορυκτέλαιου. Η απόλυτη σταθερά επηρεάζεται πολύ από την απόλυτη απορρόφηση νερού στο υγρό. [9]

1.4.3.5 Διηλεκτρική αντοχή

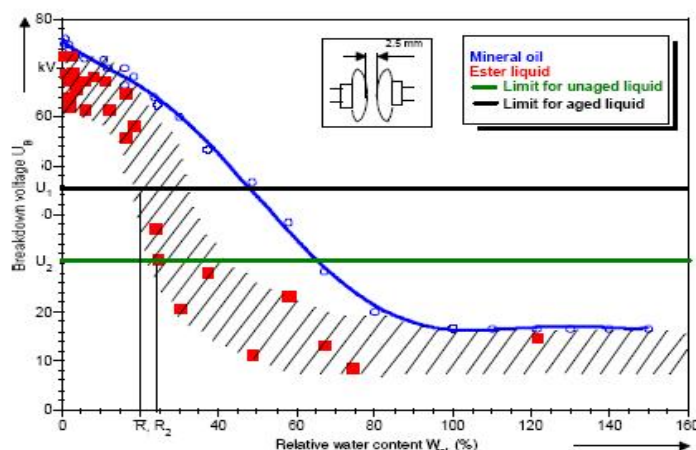
Η διηλεκτρική αντοχή ενός υγρού είναι δείκτης της μονωτικής του ικανότητας. Μεγάλη τιμή της διηλεκτρικής αντοχής ενός ελαίου εξασφαλίζει καλύτερη μόνωση των υπό τάση στοιχείων που βρίσκονται μέσα σε αυτό. Χαμηλές τιμές είναι αποτέλεσμα υγρασίας ή και ύπαρξης αιωρούμενων σωματιδίων , ινών και αερίων. Η δοκιμή εκτελείται με συσκευή η οποία αυξάνει την τάση βαθμιαία ,μέχρις ότου επέλθει διάσπαση ελαίου. Η τάση στην οποία γίνεται η διάσπαση λέγεται τάση διάσπασης. Επίσης μπορούμε να ορίσουμε σαν διηλεκτρική αντοχή την μεγάλη τιμή της τάσης που εφαρμόζεται ανάμεσα σε δύο ηλεκτρόδια που είναι μέσα στο λάδι χωρίς να δημιουργηθεί τόξο. Η διηλεκτρική αντοχή μπορεί να οριστεί διαφορετικά ως η μέγιστη πεδιακή ένταση την οποία μπορεί να υποστεί ένα διηλεκτρικό χωρίς να

απολέσει την μονωτική του ικανότητα δηλαδή χωρίς να διασπαστεί. Η διηλεκτρική αντοχή εκφράζεται σε kV για ορισμένο διακενό.

Παράγοντες που επηρεάζουν την διηλεκτρική αντοχή του λαδιού είναι :

A.Υγρασία

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η τάση διάσπασης και η διηλεκτρική αντοχή ενός ελαίου επηρεάζονται αρνητικά από την παρουσία νερού. Η αύξηση της σχετικής περιεκτικότητας σε νερό μειώνει την τιμή της τάσης διάσπασης. Η παρουσία υγρασίας στο μονωτικό λάδι αποτελεί σημαντικό παράγοντα της μονωτικής του υποβάθμισης καθώς σχηματίζει αγωγίμες γέφυρες που μπορούν να επιφέρουν την διάσπαση του.



Σχ.1.20 Τάση διάσπασης ορυκτού ελαίου και ελαίου φυσικού εστέρα σε συνάρτηση με την σχετική περιεκτικότητα σε νερό.[13]

Τα έλαια φυσικού εστέρα μπορούν να διαλύσουν πολύ περισσότερο νερό έναντι του ορυκτέλαιου προκειμένου να αποκτηθεί η ίδια σχετική περιεκτικότητα σε νερό. Επομένως για την ίδια τιμή σχετικής περιεκτικότητας σε νερό έχουμε μικρότερη τάση διάσπασης για το υγρό φυσικού εστέρα σε σχέση με το ορυκτέλαιο. Επίσης η διαφορά στην συμπεριφορά έναντι του ορυκτέλαιου μπορεί να εξηγηθεί από την διαφορά στον τρόπο απορρόφησης του νερού ή και τις καταστάσεις του νερού σε αυτά τα υγρά και την επακόλουθη αλλαγή στη μοριακή δομή τους ανάλογα με την θερμοκρασία. Η μοριακή δομή έχει σημαντική επίδραση στο επίπεδο της τάσης διάσπασης.

B. Παρουσία ξένων σωματιδίων και αερίων

Η παρουσία ξένων σωματιδίων στο λάδι μειώνει την τιμή της διηλεκτρικής του αντοχής καθώς σχηματίζουν αγωγίμες γέφυρες με αποτέλεσμα την μείωση της τιμής της τάσης διάσπασης. Το ίδιο συμβαίνει και εξαιτίας των φυσαλίδων αέρα γι' αυτό σε κάθε δοκιμή διάσπασης μεσολαβεί ένας χρόνος παύσης ώστε να εξαφανιστούν οι φυσαλίδες. Επίσης τα υγρά μονωτικά οξειδώνονται από τον αέρα με αποτέλεσμα την μείωση της διηλεκτρικής τους αντοχής. Γι' αυτό η παρουσία αέρα θα πρέπει να αποκλείεται στις κατασκευές που χρησιμοποιούνται μονωτικά λάδια. Έτσι όταν γίνεται η πλήρωση των δοχείων ελαίου των μετασχηματιστών στο στάδιο κατασκευής τους η διαδικασία γίνεται στο κενό αέρα ώστε να αποφευχθεί η παρουσία αέρα στο δοχείο λαδιού. Τέλος θα πρέπει να δίνεται προσοχή στην κατάσταση επιφάνειας των ηλεκτροδίων για να μην έχουν ξένα σωματίδια.

Γ. Θερμοκρασία

Έχει παρατηρηθεί ότι η αύξηση θερμοκρασίας διευκολύνει την διαφυγή των φυσαλίδων αέρα καθώς μειώνει το ιξώδες του λαδιού. Στο υγρό εστέρα η αύξηση της θερμοκρασίας προώθησε το σχηματισμό υπεροξειδίου και μείωσε το σχηματισμό φυσαλίδων στο έλαιο/ Η διάσπαση του μονωτικού υγρού αρχίζει συχνά από τις φυσαλίδες . Επομένως αυξάνοντας της θερμοκρασία αυξήθηκε η τάση διάσπασης. Η αύξηση της θερμοκρασίας έχει ως συνέπεια μικρότερη απόλυτη περιεκτικότητα σε νερό αλλά αυξάνει τη διαλυτότητα σε νερό του υγρού. Επιπλέον η αύξηση θερμοκρασίας μειώνει σημαντικά τη σχετική περιεκτικότητα σε νερό στο έλαιο άρα η διηλεκτρική αντοχή αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Τέλος έχει παρατηρηθεί ότι ο φυσικός εστέρας διατηρεί υψηλότερη διηλεκτρική αντοχή ειδικά σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Δ. Η διάταξη των ηλεκτροδίων

Η διηλεκτρική αντοχή εξαρτάται επίσης από το εφαρμοζόμενο πεδίο και τη γεωμετρία των ηλεκτροδίων, το μήκος του διακενού και το εμβαδό της επιφάνειας των ηλεκτροδίων. Από τη γεωμετρία εξαρτάται η ομοιογένεια του ηλεκτρικού πεδίου. Όσο περισσότερο ανομοιογενές είναι το πεδίο , τόσο μειώνεται η τάση διάσπασης. Επίσης έχει παρατηρηθεί ότι η αύξηση του μήκους του διακενού βοηθά στην βελτίωση της διηλεκτρικής αντοχής του ελαίου. Όσο μεγαλύτερη είναι η επιφάνεια των ηλεκτροδίων τόσο μικρότερη γίνεται η διηλεκτρική αντοχή του λαδιού. Αυτό συμβαίνει διότι η μεγαλύτερη επιφάνεια ηλεκτροδίων αναμένεται να έχει περισσότερες προεξοχές και ανωμαλίες.

Ε. Γήρανση του ελαίου

Ο χρόνος αποθήκευσης του ελαίου χωρίς αυτό να καταπονείται δρα αρνητικά πάνω στην διηλεκτρική αντοχή καθώς αυξάνεται το ποσοστό υγρασίας στο έλαιο. Μόνο μετά από συνεχείς και επαναλαμβανόμενες διασπάσεις αρχίζει να αυξάνεται σταδιακά η τιμή της τάσης διάσπασης του ελαίου καθώς αρχίζει να υποχωρεί η υγρασία.

Ζ. Ποιότητα και τύπος ελαίου

Η διηλεκτρική αντοχή του ελαίου είναι πολύ ευαίσθητη στην ποιότητα του ελαίου και μπορεί να επηρεαστεί από την παρουσία ακαθαρσιών ,την υγρασία , τα μόρια και τα αέρια .Ακόμα και αν η τάση διάσπασης περισσότερο συνδέεται με την ποιότητα του ελαίου και τη χημεία του ,για την σύγκριση διαφορετικών ελαίων ελέγχεται καλά η περιεκτικότητα σε ακαθαρσίες. Ο τύπος του ελαίου είναι καθοριστικός παράγοντας για τη διηλεκτρική αντοχή. Οι φυτικοί εστέρες τείνουν να έχουν υψηλότερη διηλεκτρική αντοχή από τα ορυκτά έλαια.

Η. Το είδος της εφαρμοζόμενης τάσης

Η διηλεκτρική αντοχή υπό κρουστική τάση είναι μεγαλύτερη απ' ό τι με εναλλασσόμενη τάση 50 Hz υπό 1 λεπτό. Υπό συνεχή τάση η διηλεκτρική αντοχή είναι μεγαλύτερη απ' ό τι με εναλλασσόμενη.

Θ. Πίεση (εξωτερική ή υδροστατική)

Η διηλεκτρική αντοχή αυξάνεται απότομα στην αρχή και μετά λιγότερο με την αύξηση της πίεσης. Περισσότερη εξάρτηση από την πίεση δείχνει η διηλεκτρική αντοχή του λαδιού σε εναλλασσόμενη τάση και ακολουθεί η συνεχής τάση , ενώ για κρουστική η εξάρτηση εξαφανίζεται . [9]

Με βάση τα παραπάνω καταλήγουμε στα εξής :

Πλεονεκτήματα χρήσης φυτικών εστέρων:

1. Είναι φιλικό προς το περιβάλλον δεν δημιουργούν τοξικά κατάλοιπα.
2. Έχουν υψηλά ποσοστά βιοαποικοδομησιμότητας.
3. Μπορούν να ανακυκλωθούν.
4. Παράγονται από φυτικά προϊόντα όπου είναι διαθέσιμα σε αφθονία.
5. Έχουν υψηλά σημεία ανάφλεξης και καύσης σε σχέση με το ορυκτέλαιο.
6. Διατηρούν το χαρτί της μόνωσης κυτταρίνης σε καλύτερη κατάσταση, αυξάνοντας την διάρκεια ζωής του μετασχηματιστή.
7. Τα προϊόντα οξείδωσης τους δεν σχηματίζουν ιζήματα λάσπης
8. Δεν αυξάνεται η όξινη παραγωγή με την παρουσία χαλκού
9. Έχουν υψηλότερη τιμή τάσης διάσπασης από το ορυκτέλαιο λόγω της χαμηλής σχετικής περιεκτικότητας σε νερό
10. Η υγρασία ασκεί λιγότερη επίδραση στη διηλεκτρική αντοχή των εστέρων.
11. Οι φυσικοί εστέρες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές retrofilling.

Μειονεκτήματα χρήσης φυτικών εστέρων :

1. Έχουν μειωμένη σταθερότητα ενάντια στην οξείδωση αλλά αυτό αντιμετωπίζεται με χρήση αντιοξειδωτικών πρόσθετων.
2. Έχουν υψηλότερο ιξώδες από το ορυκτέλαιο.
3. Η οξύτητα αυξάνεται με την περιεκτικότητα σε εστέρα.
4. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο με σφραγισμένους μετασχηματιστές.
5. Έχουν υψηλότερο κόστος παραγωγής.
6. Ο παράγοντας απωλειών αυξάνεται με την περιεκτικότητα σε εστέρα. [9]

1.4.4 Μηχανισμοί διάσπασης μονωτικών λαδιών

1.4.4.1 Γενικά

Το γενικό επίπεδο γνώσης επί της ηλεκτρικής διάσπασης σε υγρά είναι λιγότερο γνωστό από ότι είναι στην περίπτωση των αερίων ή ακόμη και των στερεών. Πολλές απόψεις για τη διάσπαση υγρών έχουν ερευνηθεί κατά τις τελευταίες δεκαετίες, αλλά τα ευρήματα και τα συμπεράσματα πολλών ερευνητών δε μπορούν να εναρμονιστούν και να παράγουν μια γενική θεωρία εφαρμόσιμη σε υγρά. Η κύρια αιτία για αυτήν την κατάσταση είναι η έλλειψη αναλυτικής θεωρίας όσο αφορά στη φυσική βάση της υγρής κατάστασης, η οποία θεωρία θα σχημάτιζε τη σκελετική δομή με την οποία οι παρατηρήσεις θα μπορούσαν να συγκριθούν και να συσχετισθούν.

Εκτενείς ανασκοπήσεις των δημοσιευμένων δεδομένων επί του θέματος έχουν γίνει περιοδικά και οι πιο πρόσφατες περιλαμβάνουν αυτές των Lewis , Swann , Kok , Krasucki, Zaky, Hawley και Gallagher. Η όλη εργασία εμπίπτει γενικά σε δύο σχολές απόψεων. Η μια εξ αυτών επιχειρεί να ερμηνεύσει τη διάσπαση υγρών με ένα πρότυπο το οποίο είναι επέκταση της αέριας διάσπασης, στηριγμένο στον ιονισμό στοιβάδας των ατόμων που προκαλείται από κρούσεις ηλεκτρονίων μέσα στο εφαρμοζόμενο πεδίο. Τα ηλεκτρόνια θεωρούνται να εγγέονται από την κάθοδο στο υγρό είτε μέσω εκπομπής πεδίου, είτε μέσω θερμιονικού φαινομένου (Schottky) ενισχυμένου από το πεδίο. Αυτός ο τύπος μηχανισμού διάσπασης έχει θεωρηθεί ότι εφαρμόζεται σε ομογενή υγρά υπερβολικής καθαρότητας και δεν εφαρμόζεται σε εμπορικά εκμεταλλεύσιμη υγρή μόνωση.

Η δεύτερη σχολή ερμηνεύει τη διάσπαση των υγρών ως αποτέλεσμα παρουσίας ξένων σωματιδίων. Σε μια προσέγγιση έχει διατυπωθεί αξιωματικά ότι τα αιωρούμενα σωματίδια πολώνονται και είναι υψηλότερης διαπερατότητας από το υγρό. Ως αποτέλεσμα, αυτά υποβάλλονται σε μια ηλεκτρική δύναμη κατευθυνόμενη προς τη θέση μέγιστης έντασης. Η συσσώρευση σωματιδίων συνεχίζεται και τείνει να σχηματίσει μία ζεύξη κατά μήκος του διακένου, η οποία οδηγεί σε έναρξη διάσπασης.

Οι ρύποι μπορεί επίσης να είναι αέριες φυσαλίδες χαμηλότερης έντασης διάσπασης από το υγρό, περίπτωση κατά την οποία η διάσπαση της φυσαλίδας δύναται να πυροδοτήσει την πλήρη διάσπαση του υγρού. Οι βασικοί μηχανισμοί διάσπασης που εντοπίζονται αναλύονται παρακάτω. [9]

1.4.4.2 Ηλεκτρονική διάσπαση

Αμφότεροι οι μηχανισμοί εκπομπής πεδίου και θερμοϊονικής εκπομπής ενισχυμένης από πεδίο, έχουν θεωρηθεί υπεύθυνοι για το ρεύμα στην κάθοδο. Μελέτες αγωγής σε μονωτικά υγρά για υψηλά πεδία δείχνουν ότι τα περισσότερα πειραματικά δεδομένα για το ρεύμα προσαρμόζονται καλά στην τύπου Schottky εξίσωση, στην οποία το ρεύμα είναι εξαρτημένο από τη θερμοκρασία. Μετρήσεις διάσπασης ωστόσο δείχνουν μικρή θερμοκρασιακή εξάρτηση. Αυτό υποδεικνύει ότι η καθοδική διαδικασία είναι μάλλον εκπομπή πεδίου παρά θερμοϊονική εκπομπή.

Μόλις το ηλεκτρόνιο εγχυθεί μέσα στο υγρό, κερδίζει ενέργεια από το εφαρμοζόμενο πεδίο. Στην ηλεκτρονική θεωρία διάσπασης εικάζεται ότι μερικά ηλεκτρόνια κερδίζουν περισσότερη ενέργεια από το πεδίο, από ότι αυτά απολύουν σε κρούσεις με μόρια. Αυτά τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται μέχρι να κερδίσουν επαρκή ενέργεια, για να ιονίσουν μόρια επί κρούσεων και να εκκινήσουν στοιβάδα.

Η συνθήκη για δημιουργία στοιβάδας ηλεκτρονίων λαμβάνεται εξισώνοντας το κέρδος ενέργειας ενός ηλεκτρονίου κατά μήκος του μέσου ελεύθερου βήματός του με την ενέργεια που απαιτείται για ιονισμό του μορίου :

$$eE\lambda = chu,$$

όπου E είναι το εφαρμοζόμενο πεδίο, λ είναι το μέσο ελεύθερο βήμα ηλεκτρονίου, hu είναι το διακριτό ποσό ενέργειας που απαιτείται κατά τον ιονισμό του μορίου και c μία αυθαίρετη σταθερά.

Η ηλεκτρονική θεωρία προβλέπει ικανοποιητικά το σχετικό μέγεθος της έντασης διάσπασης υγρών, αλλά οι παρατηρούμενες χρονικές υστερήσεις σχηματισμού είναι πολύ μακρύτερες από ότι προβλέπονται από αυτήν. [14]

1.4.4.3 Μηχανισμός αιωρούμενων στερεών σωματιδίων

Στερεοί ρύποι μπορούν να είναι παρόντες στο υγρό, είτε ως ίνες είτε ως διεσπαρμένα στερεά σωματίδια. Ας θεωρήσουμε ένα σφαιρικό σωματίδιο ακτίνας r και διαπερατότητας ε να αιωρείται σε διηλεκτρικό υγρό διαπερατότητας ε_{liq}. Τότε, εντός ενός πεδίου το σωματίδιο θα πολωθεί και θα υποστεί μια δύναμη που δίνεται από τη σχέση :

$$F_e = \epsilon_{liq} * r^3 = \frac{\epsilon - \epsilon_{liq}}{\epsilon + 2\epsilon_{liq}} * E\tilde{N}(E)$$

Αυτή η δύναμη κατευθύνεται προς τη θέση μέγιστης πεδιακής έντασης αν ε > ε_{liq} αλλά για φυσαλίδες ε < ε_{liq} και αυτή έχει την αντίθετη κατεύθυνση. Η δοθείσα δύναμη από την εξίσωση αυξάνει, καθώς η διαπερατότητα (ε) του αιωρούμενου σωματιδίου αυξάνει και για ένα αγωγίμο σωματίδιο, για το οποίο ε ∞, η δύναμη γίνεται :

$$F_e = F_\infty = r^3 * E\tilde{N}(E)$$

Έτσι, η δύναμη παροτρύνει το σωματίδιο να κινηθεί στην περιοχή του ισχυρότερου πεδίου. Σε ένα διάκενο ομοιόμορφου πεδίου ή διάκενο σφαιρών μικρού μήκους το ισχυρότερο πεδίο είναι στην ομοιόμορφη περιοχή. Αν η διαπερατότητα του σωματιδίου είναι υψηλότερη από αυτή του μέσου, τότε η παρουσία του στην περιοχή ομοιόμορφου πεδίου επιφέρει συγκέντρωση ηλεκτρικής ροής στην επιφάνεια του. Επιπρόσθετα σωματίδια θα ελκυσθούν στην περιοχή υψηλότερης συγκέντρωσης ροής και με τον χρόνο θα ευθυγραμμιστούν από την κεφαλή προς τα πίσω σχηματίζοντας μια ζεύξη κατά μήκος του διακένου. Το πεδίο στο υγρό μεταξύ των σωματιδίων θα ενισχυθεί, κι αν αυτό φθάσει σε μια κρίσιμη τιμή, έπεται διάσπαση.

Η κίνηση ηλεκτρονίων λόγω ηλεκτρικής δύναμης ανταγωνίζεται από την οπισθέλκουσα (δύναμη αντιτιθέμενη στην κίνηση ενός σώματος μέσα σε ρευστό) ιξώδους και εφόσον τα σωματίδια κινούνται στην περιοχή υψηλής πεδιακής έντασης, πρέπει επίσης να ληφθεί υπόψη η διάχυση. Για ένα σωματίδιο ακτίνας r βραδέως κινούμενο με μία ταχύτητα u σε ένα μέσο ιξώδους η , η οπισθέλκουσα δύναμη δίνεται από τη σχέση του Stokes :

$$F_{drag} = 6\pi\eta u(x)$$

Εξισώνοντας την ηλεκτρική δύναμη με την οπισθέλκουσα δύναμη $F_{drag} = F_e$ λαμβάνουμε

$$U_e = (r^2 * E / 6\pi\eta) * (dE/dx)$$

όπου u_e είναι η ταχύτητα του σωματιδίου προς τη περιοχή μέγιστης πεδιακής έντασης.

Αν συμπεριληφθεί η διαδικασία διάχυσης, η ταχύτητα ολίσθησης λόγω διάχυσης θα δίνεται από την εξίσωση :

$$U_d = -(D \setminus N) * (dN/dx) = -[(kT)/(6\pi\eta)] * [dN/(N * dx)]$$

Η σχέση στο δεξί μέλος της εξίσωσης απορρέει από τη σχέση Stokes-Einstein

$D = kT/6\pi\eta$ όπου k είναι η σταθερά Boltzmann και T είναι η απόλυτη θερμοκρασία.

Η εξίσωση της u_e με τη u_d δίνει :

$$\frac{r^2 * E * dE}{6\pi\eta dx} = \left(\frac{kT}{6\pi\eta r N} \right) * \frac{dN}{dx}$$

Αυτή η σχέση εισάγει εξάρτηση της πεδιακής έντασης διάσπασης στον χρόνο από τη συγκέντρωση N των σωματιδίων, την ακτίνα τους και το ιξώδες του υγρού. Η κρίσιμη τιμή εγκάρσιου πεδίου $E(x)$, είναι η τιμή ισορροπίας πέραν της οποίας αργά ή γρήγορα θα συμβεί η διάσπαση και μπορεί να ληφθεί από ολοκλήρωση της παραπάνω εξίσωσης.

Αν η αύξηση στην ηλεκτροστατική ενέργεια, όταν τα σωματίδια ολισθαίνουν προς το μέρος μέγιστης πεδιακής έντασης, είναι πολύ μικρότερη από την κινητική τους ενέργεια, δηλαδή

$r^3 [E^2(x) - E^2(\infty)] \ll 2kT$, η ζωή της μόνωσης είναι άπειρη. Το κριτήριο για τη διάσπαση, που προκύπτει από κίνηση σωματιδίων προς την περιοχή υψηλής πεδιακής έντασης, αντιστοιχεί στη συνθήκη:

$$r^3 [E^2(x) - E^2(\infty)] = 2kT$$

Αν θεωρήσουμε την περίπτωση κατά την οποία, η αρχική μη-ομοιομορφία του πεδίου προκαλείται από ένα ημισφαιρικό κύρτωμα του ηλεκτροδίου και υποθέσουμε ότι ένα εφαρμοζόμενο πεδίο E_0 θα οδηγήσει σε διάσπαση κατόπιν μιας μακροχρόνιας εφαρμογής, τότε η μέγιστη ένταση στην κορυφή της σφαίρας είναι $3E_0$ ή, γενικά, η μέγιστη πεδιακή ένταση είναι gE_0 , όπου g είναι ένας γεωμετρικός συντελεστής. Τότε, η παραπάνω εξίσωση μπορεί να γραφτεί ως:

$$r^3 (g^2 - 1) E_0^2 = (1/4) kT$$

Για $g=3$ λαμβάνουμε:

$$r^3 * E_0^2 = (1/4) kT$$

Η εξίσωση αυτή δίνει μία πεδιακή ένταση διάσπασης E_0 μετά από μακρύ χρόνο ως μία συνάρτηση του μεγέθους των αιωρούμενων ρύπων. Αυτή η σχέση έχει ελεγχθεί πειραματικά και έχει ληφθεί λογική συμφωνία με υπολογισμούς.

Μία πιο πλήρης θεωρία δίνει μια σχέση η οποία λαμβάνει υπόψη τις διαπερατότητες και είναι της μορφής[9] :

$$\frac{\varepsilon - \varepsilon_{liq}}{\varepsilon - 2\varepsilon_{liq}} * r^2 * E_0^2 = (1/4)kT$$

1.4.4.4 Διάσπαση κοιλότητας

Μονωτικά υγρά δύναται να περιέχουν αέρια εγκλείσματα υπό τη μορφή φυσαλίδων.

Οι διαδικασίες μέσω των οποίων σχηματίζονται φυσαλίδες περιλαμβάνουν :

α) θυλάκια αέρα στην επιφάνεια ηλεκτροδίων

β) αλλαγές στη θερμοκρασία και την πίεση

γ) αποσύνδεση προϊόντων μέσω ηλεκτρονικών κρούσεων, δίνοντας αφορμή για τον σχηματισμό αέριων προϊόντων

δ) εξάτμιση υγρού από εκκενώσεις τύπου κορώνας σε ακίδες και ανωμαλίες επί των ηλεκτροδίων.

Το ηλεκτρικό πεδίο μέσα σε μία φυσαλίδα αερίου, η οποία είναι βυθισμένη σε ένα υγρό διαπερατότητας, δίνεται από τη σχέση :

$$E_b = (3E_0) / (\varepsilon_{liq} + 2)$$

όπου, E_0 είναι το πεδίο εντός του υγρού, απουσία της φυσαλίδας. Όταν το πεδίο γίνεται ίσο με το πεδίο ιονισμού αέριας φάσης, λαμβάνει χώρα εκκένωση, η οποία οδηγεί σε αποσύνθεση του υγρού και δύναται να ακολουθήσει διάσπαση. [9]

1.4.4.5 Ηλεκτρομεταφορά και ηλεκτροϋδροδυναμικό πρότυπο διηλεκτρικής διάσπασης

Η σπουδαιότητα της ηλεκτρομεταφοράς σε μονωτικά υγρά υποβαλλόμενα σε υψηλές τάσεις δεν επιδοκιμαζόταν μέχρι πρόσφατα. Η περισσότερη εργασία προέρχεται από τον Felici και τους συνεργάτες του. Σε άκρως κεκαθαμένα διηλεκτρικά υγρά υποβαλλόμενα σε υψηλή τάση, η ηλεκτρική αγωγή απορρέει κυρίως από φορείς φορτίου εγγεόμενους μέσα στο υγρό από την επιφάνεια ηλεκτροδίων. Το προκύπτον φορτίο χώρου εγείρει δύναμη Coulomb, η οποία, υπό ορισμένες συνθήκες, προκαλεί υδροδυναμική αστάθεια που παράγει μεταδιδόμενο ρεύμα. Έπεται ότι, κάθε φορά που η αγωγή σε ένα ρευστό συνοδεύεται από σχηματισμό σημαντικού φορτίου χώρου, είναι πολύ πιθανό να συμβεί κίνηση μεταφοράς. Ο Lacroix κ.α. έχουν μελετήσει τις συνθήκες υπό τις οποίες εγκαθίσταται τυρβώδης κίνηση. Χρησιμοποιώντας ηλεκτρόδια παράλληλων πλακών κι ελεγχόμενο ρεύμα έγχυσης, αυτοί έδειξαν ότι η έναρξη αστάθειας σχετίζεται με μία κρίσιμη τάση. Παρατήρησαν ότι, καθώς η εφαρμοζόμενη τάση αυξάνεται πλησίον της κρίσιμης τάσης, η κίνηση αρχικά παρουσιάζει μία δομή εξαγωνικών κυψελών. Με μία επιπλέον αύξηση στην τάση, η κίνηση γίνεται τυρβώδης. Έτσι, η αλληλεπίδραση μεταξύ ηλεκτρικού πεδίου και φορτίου χώρου γίνεται αφορμή για δυνάμεις που προσδίδουν μία στροβιλώδη κίνηση στο υγρό. Έχει αποδειχθεί, ότι σε τάσεις πλησίον στη διάσπαση, η ταχύτητα αυτής

της κίνησης πλησιάζει μία τιμή δοθείσα από τη σχέση $\sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}$ όπου ε είναι η διαπερατότητα του υγρού, ρ η ειδική μάζα και E_0 ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Σε υγρά, ο λόγος αυτής της ταχύτητας προς την ιονική ταχύτητα ολίσθησης KE (όπου K η κινητικότητα E η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου) δηλαδή, ο λόγος, είναι πάντα μεγαλύτερος της μονάδας και μερικές φορές πάρα πολύ μεγαλύτερος από αυτή. Ο

λόγος $M = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}}{k}$ θεωρείται ότι παίζει έναν κυρίαρχο ρόλο στη θεωρία ηλεκτρομεταφοράς. Έτσι, η μεταφορά φορτίου γίνεται κυρίως από κίνηση υγρού και όχι από ιονική ολίσθηση. Η συνθήκη-κλειδί για την έναρξη αστάθειας είναι να υπερβεί η ταχύτητα τοπικής ροής την ιοντική ταχύτητα ολίσθησης.[14]

1.4.4.6 Μια ενδιαφέρουσα περίπτωση με χρήση νανοσωματιδίων

Με βάση προηγούμενη ερευνητική δραστηριότητα οι ερευνητές J. George Hwang, Markus Zahn, Francis M. O'Sullivan, Leif A. A. Pettersson, Olof Hjortstam, και Rongsheng Liu ανέλυσαν την επίδραση αγώγιμων νανοσωματιδίων σε μονωτικό λάδι μετασχηματιστή. Πειραματικά, κι ενώ αναμενόταν μικρότερη τάση διάσπασης από ότι στο σκέτο λάδι, αποδείχθηκε ότι έχει υψηλότερη καθοδική τάση διάσπασης και μικρότερη ταχύτητα δημιουργίας στοιβάδας ηλεκτρονίων. Επίσης, με βάση τη μελέτη αναλύθηκαν ηλεκτροδυναμικά οι διαδικασίες που επιδρούν σε αυτή τη συμπεριφορά και ένα μοντέλο για το σχηματισμό στοιβάδας στη συγκεκριμένη περίπτωση. Με τη χρήση μαθηματικών μεθόδων το μοντέλο παρουσιάζει τα αγώγιμα σωματίδια ως συλλέκτες ηλεκτρονίων μετατρέποντας τα γρήγορα κινούμενα ηλεκτρόνια σε αργά, αρνητικά φορτισμένα σωματίδια. Η έρευνα σκόπευε στο να ανιχνευθεί εάν τα νανοσωματίδια μπορούν να χρησιμεύσουν στην ψύξη του πυρήνα των μετασχηματιστών ισχύος.[7]

1.4.5 Γήρανση-Προϊόντα κατά την αποδόμηση των ελαίων

Αξίζει να αναφέρουμε ότι η γήρανση των μονωτικών ελαίων οφείλεται κυρίως στην:

- Οξείδωση, που λαμβάνει χώρα όταν το λάδι εκτίθεται σε υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλα χρονικά διαστήματα.
- Αποσύνθεση των μορίων του, λόγω θερμών ζωνών και μερικών εκκενώσεων. [3]

1.4.5.1 Οξείδωση

Όταν το λάδι θερμαίνεται, ξεκινά η διαδικασία της οξείδωσης του, η οποία παράγει πολικές ενώσεις (polar compounds), αυξάνει την οξύτητα του διαλύματος και τη περιεκτικότητα του σε υπεροξείδια (O₂) και μειώνει την διεπιφανειακή τάση του ελαίου (interfacial tension). Όταν δεν υπάρχουν πρόσθετα στο έλαιο, η οξείδωση συνεχίζεται μέχρι τον κορεσμό, δηλαδή μέχρις ότου η οξύτητα του λαδιού φτάσει τα 0,2mg KOH/g λαδιού, η επιφανειακή τάση πέσει κάτω από τα 10 mN/m και αρχίσει ο σχηματισμός στερεών όξινων ενώσεων ή λάσπης (ζήματα). Ο βαθμός της οξείδωσης του ελαίου, υπολογίζεται συνήθως από τη τιμή της οξύτητας του, τη περιεκτικότητα του σε υπεροξείδια και τη διεπιφανειακή τάση. Προκειμένου να επιβραδυνθεί η οξείδωση, προστίθενται συνήθως αναστολείς όπως το DBPC ή αλλιώς BHT (2, 6-ditertiary-butyl paracresol), σε νέα ή ακόμα και ανακυκλωμένα έλαια. Η οξείδωση τότε, βρίσκεται υπό έλεγχο, όσο ο αναστολέας είναι ενεργός στο διάλυμα. Γρήγορες αυξήσεις στην οξύτητα και στις πολικές ενώσεις, οδηγούν σε γρήγορη πτώση της διεπιφανειακής τάσης όταν εξαντληθεί το DBPC. Ο σχηματισμός λάσπης ξεκινάει μετά από λίγο, ο οποίος συνοδεύεται με διάβρωση στον χαλκό που υπάρχει στο λάδι, και με κορεσμό του ελαίου με προϊόντα οξείδωσης. [3]

1.4.5.2 Αποσύνθεση των μορίων του ελαίου

Οι θερμές ζώνες οι μερικές εκκενώσεις, τα ηλεκτρικά τόξα, κτλ., εξαιτίας των υψηλών θερμοκρασιών που τα συνοδεύουν, μπορούν να υποβαθμίσουν μία μόνωση ελαίου σε μεγαλύτερο βαθμό και να δημιουργήσουν προϊόντα και κατάλοιπα, τα

οποία είναι συγκεκριμένα για το μονωτικό υγρό. Μικρού επιπέδου μερικές εκκενώσεις, παράγουν μεγάλες ποσότητες υδρογόνου(H_2) και μικρό-ποσότητες μεθανίου (CH_4). Η υπερθέρμανση του ελαίου παράγει αιθυλένιο(C_2H_4), ενώ τα ηλεκτρικά τόξα παράγουν ασετιλίνη (C_2H_2). Η ανακύκλωση του ελαίου πρέπει να γίνει γρήγορα αμέσως μετά την εξάντληση των προσθέτων (βελτιωτικών), για να αποφευχθεί η καταστροφή του ελαίου από την οξείδωση.

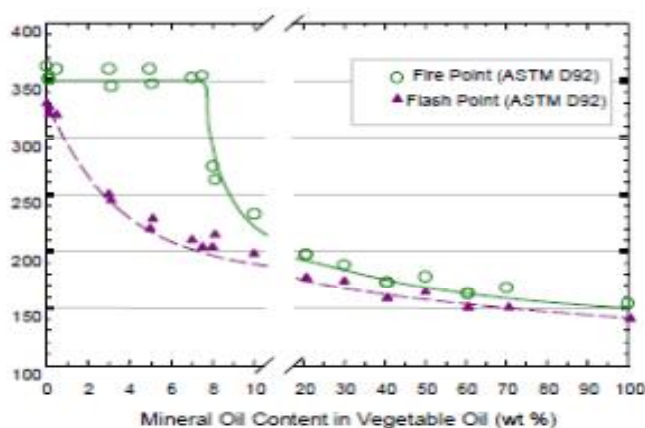
Σε καλώδια, στα οποία χρησιμοποιείται το λάδι σαν μόνωση, χρησιμοποιούνται αρωματικές ενώσεις ώστε να αυξηθεί η ικανότητα απορρόφησης αερίων του ελαίου. Μετρώντας συνεπώς τη περιεκτικότητα του ελαίου σε αρωματικές ενώσεις μπορούμε να αξιολογήσουμε τη δυνατότητα του να αποτρέπει το κορεσμό του , λόγω των διαλυμένων σε αυτό αερίων(self-Healing).

1.4.6 Retrofilling

Μια εφαρμογή που παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα φυτικά έλαια , είναι αυτή της αντικατάστασης του ορυκτέλαιου σε ένα μετασχηματιστή , με στόχο αφ' ενός τη βελτίωση της ασφάλειας έναντι της πιθανότητα φωτιάς, λόγω του υψηλού σημείου ανάφλεξης του φυτικού ελαίου , αλλά και ενδεχομένως την επέκταση της απομένουσας θερμικής ζωής του, μέσω της βελτίωσης της κατάστασης του μονωτικού χαρτιού.

Τα φυτικά έλαια είναι απολύτως συμβατά με τα ορυκτέλαια και κανένα λειτουργικό πρόβλημα δεν παρουσιάζεται με την ανάμειξή τους .Ένα φυτικό έλαιο διατηρεί το υψηλό σημείο ανάφλεξης του ακόμα και με την παρουσία έως 7,5% ορυκτελαίου .Αυτό το καθιστά ιδανικό για εφαρμογές retrofill , όπου είναι δεδομένο ότι ένα ποσοστό ορυκτελαίου θα παραμείνει στον μετασχηματιστή ακόμα και μετά από πολύ προσεκτικό πλύσιμο.

Η εικόνα 1.22 παρουσιάζει σειρά δειγμάτων χαρτιού που υποβλήθηκαν σε πείραμα γήρανσης. Η τελευταία σειρά δειγμάτων παρουσιάζει ένα μετασχηματιστή του οποίου το ορυκτέλαιο έχει αντικατασταθεί με φυτικό έλαιο . Το χαρτί της τελευταίας σειράς ,υποβλήθηκε σε γήρανση ,αρχικώς σε ορυκτέλαιο (150 ώρες) και στη συνέχεια σε φυτικό έλαιο για 3000 ώρες . Η ευεργετική επίδραση του φυτικού ελαίου είναι σαφής αφού το χαρτί διατήρησε μέχρι τέλος του πειράματος την ελαστικότητα του και παρέμεινε κατάλληλο για χρήση, όπως και το χαρτί που είχε εξαρχής εμβαπτιστεί σε φυτικό έλαιο. [9][3]



Σχ.1.21

Σημείο ανάφλεξης (°C)σε σχέση με το ποσοστό ορυκτελαίου στο φυτικό έλαιο

Τα πειραματικά στοιχεία αποδεικνύουν ότι η αντικατάσταση του ορυκτελαίου με φυτικό έλαιο μπορεί να δημιουργήσει σε παράταση της υπολειπόμενης θερμικής ζωής του.[15]



Σχήμα :1.22

Αποτελέσματα πειράματος γήρανσης ,χαρτί αρχικά εμβαπτισμένο σε ορυκτέλαιο που αντικαθίσταται από φυτικό έλαιο

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: NANOTEΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ NANΟΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΑ

Νανοτεχνολογία είναι η επιστήμη που αναφέρεται στη δημιουργία νέων υλικών, διαδικασιών και συστημάτων, με διαστάσεις στην κλίμακα του νανόμετρου (1-120nm). Σκοπός είναι η ελεγχόμενη διάταξη ατόμων και μορίων για τη χρήση των νέων ιδιοτήτων αυτών των υλικών.

Η συμβολή της νανοτεχνολογίας είναι σημαντική σε πολλούς τομείς της επιστήμης με αντίκτυπο στην καθημερινή ζωή. Στον τομέα της ιατρικής για τη δημιουργία φαρμάκων [17,18], στην τεχνολογία φωτοβολταϊκών για τη συλλογή του φωτός [19,20], στην τεχνολογία οπτικών μέσων (nanoLED), στη δημιουργία λυπαντικών και μονωτικών υλικών και σε πολλές άλλες εφαρμογές.

2.1 Νανοέλαια

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, έρευνες έχουν δείξει πως τα νανοσωματίδια είναι δυνατόν να αναμειχθούν με μονωτικά έλαια και να σχηματίσουν νανοϋγρά (nanofluids) [21]. Ο όρος νανοϋγρά χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Choi και τους συνεργάτες του και αναφέρεται ως ένα μίγμα υγρής βάσης με νανοσωματίδια ως μέσο διασποράς [22]. Πρέπει όμως να σημειωθεί ότι, ήδη από το 1873, ο Maxwell εισήγαγε την ιδέα προσθήκης σωματιδίων μέσα σε υγρό για τη βελτίωση της θερμικής τους αγωγιμότητας. Το πρόβλημα ήταν ότι τα σωματίδια με διαστάσεις μικροσωματιδίων οδηγούσαν σε συσσωμάτωση [23]. Με την εμφάνιση της νανοτεχνολογίας, δόθηκαν νέες προοπτικές για την αντιμετώπιση του προβλήματος της συσσωμάτωσης και της δημιουργίας ιζημάτων. Στον τομέα των μονωτικών ελαίων, υπάρχουν πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα που δείχνουν ότι η προσθήκη νανοσωματιδίων σε συμβατικά έλαια μετασχηματιστών συμβάλλει στη

βελτίωση των θερμικών και των ηλεκτρικών τους χαρακτηριστικών [23-34]. Η βελτίωση αυτών των χαρακτηριστικών έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης και τη

μείωση του κόστους στη λειτουργία των μετασχηματιστών. Παρ' όλα αυτά, λίγες ερευνητικές ομάδες έδωσαν συνέχεια στη μελέτη των ναοελαίων γιατί το πρόβλημα της συσσωμάτωσης εμφανίστηκε από τα πρώτα πειράματα [21].

Για τη σύνθεση των ναοϋγρών έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα είδη ναοσωματιδίων. Η βελτίωση της θερμικής αγωγιμότητας σε συνδυασμό με την αύξηση της διηλεκτρικής αντοχής έχει διαπιστωθεί σε δείγματα με τη χρήση διαφορετικών τύπων ναοσωματιδίων, όπως TiO_2 [35,36], SiO_2 [37], Fe_3O_4 [37,38] αλλά και ναοδιαμαντιών [39]. Αξίζει να σημειωθεί πως η ομάδα εργασίας των Ayayan, Taha-Tijerina et al [34], δημιούργησε ναοέλαια με τη χρήση ναοϋλικών δύο διαστάσεων, BN και γραφενίου. Πολλές ερευνητικές ομάδες έχουν πραγματοποιήσει απλή προσθήκη ναοσωματιδίων σε μήτρα ελαίου μετασχηματιστή [26, 27, 37, 40]. Τα ναοέλαια αυτά εμφάνισαν βελτιωμένες ιδιότητες, που προέκυψαν από μετρήσεις διηλεκτρικών απωλειών και ηλεκτρικής αγωγιμότητας.

Αρκετές τεχνικές επιφανειακής τροποποίησης των ναοσωματιδίων έχουν χρησιμοποιηθεί για τη σύνθεση των ναοϋγρών. Αντικείμενο έρευνας έχει υπάρξει η επεξεργασία της επιφάνειας των διαθέσιμων ναοσωματιδίων [31-34, 36-43]. Παρ' όλο που έχουν δοκιμαστεί διάφορες τεχνικές επιφανειακής τροποποίησης ανόργανων ναοσωματιδίων με σκοπό την αύξηση της διασποράς στη μήτρα τους, σε όλες τις εφαρμογές παρατηρείται το φαινόμενο της συσσωμάτωσης και των ιζημάτων [32,43]. Αρκετά μόρια έχουν χρησιμοποιηθεί ως επίχρισμα επικάλυψης, όπως το δωδεκυλοβενζινοσουλφικό οξύ (dodecyl-benzenesulphonic acid), το λαουρικό οξύ (lauric acid), το μυριστικό οξύ (myristic acid), το οξειδίο της τριοκτολοφωσφίνης (trioctylphosphine oxide - TOPO), η τριφαινυλοφωσφίνη (triphenylphosphine - TPP), η δωδεκυλοθειόλη (dodecanethiol - DDT), το βρωμιούχο τετραόκτυλο αμμώνιο (tetraoctylammonium bromide - TOAB) και το ολεϊκό οξύ.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος επιφανειακής τροποποίησης ναοσωματιδίων Fe_3O_4 με ολεϊκό οξύ. Η τεχνική αυτή, επικάλυψης και σύνθεσης κολλοειδών μορφών, βασίζεται στη θεωρία DLVO (Boris Derjaguin and Lev Landau, Evert Verwey and Theodoor Overbeek). Η θεωρία αυτή δίνει την κλασική εξήγηση για τη σταθερότητα των κολλοειδών αιωρημάτων και στηρίζεται στη μεταβολή της δυναμικής ενέργειας κατά την προσέγγιση δύο κολλοειδών σωματιδίων [44-48]. Σύμφωνα με αυτήν τη θεωρία, μεταξύ των κολλοειδών ασκούνται αντίθετες δυνάμεις, οι οποίες αναφέρονται στην ηλεκτρική άπωση και έλξη και σχετίζονται με τις διαμοριακές δυνάμεις van der Waals. Στην ουσία, η ελκτική δύναμη μεταξύ δύο κολλοειδών σωματιδίων είναι η συνισταμένη των ελκτικών δυνάμεων, που ασκούνται μεταξύ των μορίων των δύο σωματιδίων.

Η διατήρηση της σταθερότητας ενός συστήματος κολλοειδών επιτυγχάνεται με τη διατήρηση της κινητικής και της θερμοδυναμικής εξισορρόπησης του συστήματος. Οι δύο βασικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ναοσωματιδίων δημιουργούνται λόγω των ελκτικών δυνάμεων van der Waals και των απωστικών δυνάμεων ηλεκτροστατικού δυναμικού. Πρόκειται, δηλαδή, για μια διασωματιδιακή έλξη λόγω διαμοριακών δυνάμεων van der Waals και μια ηλεκτροστατική άπωση λόγω της επικάλυψης των διάχυτων διπλοστοιβάδων.

Τα ναοσωματίδια αποτελούνται από τρία ηλεκτρικά επίπεδα αλληλεπίδρασης (bond layer, bound layer, loose layer).

Στην περίπτωση που οι ελκτικές δυνάμεις υπερिशύουν έναντι των απωστικών δυνάμεων, εμφανίζεται το φαινόμενο της συσσωμάτωσης των νανοσωματιδίων. Στην αντίθετη περίπτωση, που οι απωστικές δυνάμεις υπερिशύουν έναντι των ελκτικών δυνάμεων, αποτρέπεται το φαινόμενο της συσσωμάτωσης και επιτυγχάνεται η σταθερότητα του νανοϋγρού. Η αντιμετώπιση του προβλήματος της συσσωμάτωσης μπορεί να επιτευχθεί με τη μείωση των ελκτικών δυνάμεων και την αύξηση των απωστικών δυνάμεων. Η αύξηση της απωστικής ενέργειας δημιουργεί ηλεκτρικά επίπεδα στην επιφάνεια των νανοσωματιδίων με αποτέλεσμα την ηλεκτροστατική σταθερότητα. Η προσθήκη μακρομορίων στην επιφάνεια των νανοσωματιδίων αυξάνει την απόσταση των νανοσωματιδίων και προκαλεί μείωση των ελκτικών δυνάμεων.

Από τη θεωρία DLVO προκύπτουν εξισώσεις για τη συνολική ενέργεια αλληλεπίδρασης μεταξύ των νανοσωματιδίων. Πρόκειται, στην ουσία, για το αλγεβρικό άθροισμα της ενέργειας λόγω των ελκτικών δυνάμεων van der Waals και των απωστικών δυνάμεων ηλεκτροστατικού δυναμικού. Οι εξισώσεις της θεωρίας DLVO είναι οι εξής [49]:

$$\Phi_{\text{total}}(h) = \Phi_{\text{el}}(h) + \Phi_{\text{vdW}}(h)$$

$$\Phi_{\text{el}}(h) = \frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r r_c^2}{(r_c + r_c^2)} \{ 2\phi_1 \phi_2 + (\phi_1^2 + \phi_2^2) \ln[1 - \exp(-2kh)] \}$$

$$\Phi_{\text{vdW}}(h) = -\left[\frac{A_{123} r_c^2}{6h(r_c + r_c^2)} \right] [1 + \dots]$$

Όπου:

h = η απόσταση των νανοσωματιδίων A_{123} = η σύνθετη σταθερά Hamaker του υλικού λ = το χαρακτηριστικό μήκος κύματος της αλληλεπίδρασης σφαίρα-σφαίρα r_c, r_c^2 = οι ακτίνες των σφαιρών ϕ_1, ϕ_2 = τα δυναμικά z των νανοσωματιδίων $k = \eta$ σταθερά Boltzmann h = η σταθερά Planck

Μια απλοποιημένη μορφή, που προκύπτει για δύο ίδιες σφαίρες, είναι η εξής [49]:

$$V_{\text{total}}(d) = V_{\text{el}}(d) + V_{\text{vdW}}(d)$$

$$V_{\text{el}}(h) = k$$

$$V_{\text{vdW}}(h) = -\frac{Aa}{12d}$$

Όπου:

d = η απόσταση των νανοσωματιδίων

a = η ακτίνα του νανοσωματιδίου

$1/k$ = το πάχος του διπλού επιπέδου

Με βάση το μοντέλο DLVO, η ερευνητική ομάδα του Tanaka [50] δημιούργησε το μοντέλο πολλαπλού πυρήνα. Με το μοντέλο αυτό, έγινε ανάλυση της επιρροής των νανοσωματιδίων στα στερεά νανοςύνθετα και όρισε τα τρία επίπεδα αλληλεπίδρασης, όπως φαίνεται στην προηγούμενη εικόνα. Σύμφωνα με αυτό το απλοποιημένο μοντέλο, το πρώτο επίπεδο είναι της τάξης του 1nm και είναι ισχυρά συνδεδεμένο στο νανοσωματίδιο. Το δεύτερο επίπεδο είναι της τάξης των 2-9nm και αποτελείται από ισχυρές πολυμερικές αλυσίδες. Το τρίτο επίπεδο αλληλεπιδρά με το δεύτερο και αποτελείται από πολυμερικές αλυσίδες, που αλληλεπιδρούν και με το υλικό πλήρωσης, δηλαδή τη μήτρα του νανοςύνθετου υλικού, με αποτέλεσμα τη μεταβολή της κινητικότητας, της μορφής και του όγκου των αλυσίδων [51,52]. Στα στερεά νανοςύνθετα, είναι δύσκολη η εμφάνιση συσσωματώσεων κατά το σχηματισμό των νανοςυνθέτων. Αντίθετα, στα υγρά νανοςύνθετα είναι δύσκολη η διατήρηση της σύνθεσης και η σωστή διασπορά των νανοσωματιδίων για μεγάλο χρονικό διάστημα.[16]

2.2 Απόκριση νανοσωματιδίων υπό την επίδραση ηλεκτρικού πεδίου

Το μοντέλο της ερευνητικής ομάδας του J. Hwang [53] συνέβαλε σημαντικά στην ανάλυση και στη μελέτη των νανοελαίων. Σε αυτό το μοντέλο, περιγράφεται ο μηχανισμός με τον οποίο μεταβάλλονται οι ιδιότητες των νανοσωματιδίων μέσα σε μια μήτρα ελαίου. Με το πέρασ του χρόνου, υπό την επίδραση εξωτερικά εφαρμοζόμενου ηλεκτρικού πεδίου, τα νανοσωματίδια αποκτούν κυρίως αρνητική φόρτιση.

Η ερευνητική ομάδα του J.Hwang ασχολήθηκε με τη μοντελοποίηση της αλληλεπίδρασης των νανοσωματιδίων μέσα σε μήτρα ελαίου μετασχηματιστή. Από τα αποτελέσματα της έρευνας, διαπιστώθηκε ότι τα νανοσωματίδια δεσμεύουν περίπου 6-12 ηλεκτρόνια, ανάλογα με το μέγεθός τους, σε ελάχιστο χρόνο. Για τα νανοσωματίδια Fe₃O₄, ο χρόνος αυτός είναι 10-14sec. Ο χρόνος αυτός είναι πολύ μικρότερος από τον χρόνο δημιουργίας ενός streamer στο έλαιο, που είναι της τάξης (ns- ms). Ο χρόνος χαλάρωσης (relaxation time) ενός νανοσωματιδίου συνδέεται άμεσα με τη δυνατότητα επίδρασης του νανοσωματιδίου στη μήτρα που θα εισέλθει. Ο χρόνος χαλάρωσης θεωρείται σημαντικό μέγεθος και, για ένα νανοσωματίδιο σε μήτρα ελαίου μετασχηματιστή, δίνεται από τη σχέση [59]:

$$\tau = (2\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / (2\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2.7)$$

Όπου:

ε_1 = η διηλεκτρική σταθερά του νανοσωματιδίου (2.2εο για Fe₃O₄)

ε_2 = η διηλεκτρική σταθερά του ελαίου

σ_1 = η αγωγιμότητα του νανοσωματιδίου (1x10⁻¹² S/m για Fe₃O₄)

σ_2 = η αγωγιμότητα του ελαίου

Η επιλογή των κατάλληλων νανοσωματιδίων για χρήση σε νανοέλαια εξαρτάται και από τον χρόνο χαλάρωσης. Η διατήρηση του χρόνου χαλάρωσης σε χαμηλά επίπεδα επιτρέπει την άμεση απορρόφηση των ηλεκτρονίων από τα νανοσωματίδια, με αποτέλεσμα τη βελτιωμένη διηλεκτρική αντοχή. Ενδεικτικά, ο χρόνος χαλάρωσης για τα νανοσωματίδια Al₂O₃ είναι 12.2sec και καθιστά τα νανοσωματίδια αυτά ακατάλληλα για χρήση σε νανοέλαια. Ο μηχανισμός «παγίδα ηλεκτρονίων» (electron trap) σε γρήγορο χρόνο επηρεάζει όλα τα ηλεκτροδυναμικά φαινόμενα και, κατ' επέκταση, όλα τα μοντέλα που εφαρμόζονται στα μονωτικά έλαια. Αυτό οφείλεται στο ότι τα νανοσωματίδια απορροφούν τα ηλεκτρόνια πολύ πριν επηρεαστούν από τη ζώνη ιονισμού.

Για τη φόρτιση των νανοσωματιδίων υπάρχει ένα όριο, το οποίο ονομάζεται σημείο κορεσμού. Εάν ένα νανοσωματίδιο παρουσιάζει τέλεια αγωγιμότητα, τα ηλεκτρόνια επικάθονται σε αυτό το σωματίδιο. Στην περίπτωση, όμως, που το νανοσωματίδιο αποκτήσει αρνητική φόρτιση και φτάσει σε σημείο κορεσμού, δε μπορούν να προσαρτηθούν σε αυτό άλλα ηλεκτρόνια. Το χαρακτηριστικό φορτίο κορεσμού Q_s δίνεται από τον τύπο (2.1) για τα νανοσωματίδια Fe₃O₄ [53] και από τον τύπο (2.2) για τα νανοσωματίδια γραφενίου και νανοσωλήνων άνθρακα (CNT) [54].

$$Q_s = -12\pi\varepsilon_1 R^2 E_0 \quad (2.1)$$

$$Q_s = -3\pi\varepsilon_1 R^2 E_0 \quad (2.2)$$

Όπου:

ε_1 = η διηλεκτρική σταθερά του νανοσωματιδίου (F/m)

R = η διάμετρος του νανοσωματιδίου (nm)

E₀ = το εξωτερικά επιβαλλόμενο ηλεκτρικό πεδίο (V/m)

Για κάποιες ενδεικτικές τιμές των παραπάνω μεγεθών, για τα νανοσωματίδια Fe₃O₄, προκύπτει η τιμή φορτίου $Q_s = 7.34 \times 10^{-18}$ C, η οποία αντιστοιχεί σε 44 περίπου ηλεκτρόνια.

$$\epsilon_1 = 2.2\epsilon_0$$

$$R = 10\text{nm}$$

$$EO = 1 \times 10^8 \text{ V/m}$$

Τα νανοςωματίδια έχουν πολύ μικρότερη κινητικότητα σε σύγκριση με τα ηλεκτρόνια, αλλά και από τα θετικά ιόντα επειδή έχουν μεγαλύτερο βάρος. Έτσι, τα νανοςωματίδια, που έχουν αποκτήσει αρνητική φόρτιση, δρουν ως αρνητικά ιόντα με πιο χαμηλούς ρυθμούς. Η κινητικότητα ενός αρνητικά φορτισμένου νανοςωματιδίου δίνεται από τον τύπο [59].

$$\mu_{nr} = IQ_sI / 4\pi nR$$

Όπου:

μ = η κινητικότητα του νανοςωματιδίου ($\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)

R = η διάμετρος του νανοςωματιδίου (nm)

Q_s = το φορτίο κορεσμού (C)

n = το ιξώδες του ελαίου (Pa.s)

Εάν το ιξώδες του ελαίου πάρει την τιμή $n=0.02\text{Pa.s}$, τότε η τιμή της κινητικότητας γίνεται $\mu_{nr} = 19 \times 10^{-10} \text{ m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$.

ΙΔΙΟΤΗ ΤΕΣ	Fe ₃ O ₄	ZnO	Al ₂ O ₃	SiO ₂ [Quartz]	SiO ₂ [Silica]
Πυκνότη τα [g/cm ³]	5.17	5.61	3.96	2.65	2.20
Ηλεκτρι κή Αγωγιμό τητα [S/m]	1x10 ⁴ - 1x10 ⁵	10-100	1x10 ⁻¹²	1.3x10 ⁻¹⁸	1.4x10 ⁻⁹
Σχετική Διηλεκτρ ική Σταθερά	80	7.4-8.9	9.9	3.8-5.4	3.8
Χρόνος Χαλάρω σης [s]	7.47x10 ⁻¹⁴	1.05x10 ⁻¹¹	12.2	36.3	5.12x10 ⁻²
Θερμική Αγωγιμό τητα [W/mK]	4-8	23.4	30	11.1	1.4

Πίνακας 2.1: Ηλεκτρικές και θερμικές ιδιότητες ορισμένων ενδεικτικών νανοςωματιδίων [59][16].

2.3 Συμπεριφορά νανοελαίου υπό την επίδραση μαγνητικού πεδίου

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η συμπεριφορά των νανοςωματιδίων μέσα σε ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο, όπως τα νανοέλαια που χρησιμοποιούνται σε μετασχηματιστές. Η επίλυση αυτού του ζητήματος θα ανοίξει νέους ορίζοντες στις εφαρμογές των νανοελαίων. Σε ένα μετασχηματιστή δημιουργούνται μαγνητικά πεδία, τα οποία έχουν την τάση να μαγνητίζουν τα νανοςωματίδια και να τα αποδεσμεύουν από τη μήτρα τους. Ο μαγνητίτης Fe₃O₄ και ο αιματίτης Fe₂O₃ είναι

μαγνητικά νανωσωματίδια και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε τέτοιες εφαρμογές. Στα μαγνητικά νανωσωματίδια, τόσο η σταθερότητα, όσο και η αποφυγή του μαγνητισμού, εξασφαλίζουν τη βελτιωμένη απόδοση σε βάθος χρόνου. Η μαγνητική ενέργεια που χαρακτηρίζει ένα νανωσωματίδιο δίνεται από τη σχέση (2.3) [55].

$$EM = \mu_0 M H \pi d^3 / 6 \quad (2.3)$$

Όπου:

μ_0 = η μαγνητική διαπερατότητα του κενού ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{Hm}$)

M = η ένταση του μαγνητικού πεδίου του μαγνητικού νανωσωματιδίου (A/m)

H = η ένταση του εξωτερικά επιβαλλόμενου μαγνητικού πεδίου (A/m)

d = η διάμετρος του μαγνητικού νανωσωματιδίου (nm)

Για τη διατήρηση της σταθερότητας των νανωσωματιδίων μέσα στο μαγνητικό πεδίο, θα πρέπει ο λόγος ανάμεσα στη θερμική ενέργεια του νανωσωματιδίου και τη μαγνητική ενέργεια να είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα. Θα πρέπει δηλαδή:

$$kT > \mu_0 M H \pi d^3 / 6$$

Στη μελέτη του R.E.Rosenweig [55] προκύπτει ότι για τον μαγνητίτη, με μαγνήτιση 446 kA/m, η διάμετρος του νανωσωματιδίου θα πρέπει να είναι 8.1nm. Να σημειωθεί ότι η ελάχιστη διάμετρος νανωσωματιδίων αυτού του τύπου, που κυκλοφορούν στο εμπόριο, είναι 10nm. [16]

2.4 Συμπεριφορά νανοελαίου υπό την επίδραση της βαρύτητας

Στα έλαια που χρησιμοποιούνται σε μετασχηματιστές, εκτός από τη συμπεριφορά του νανοελαίου υπό την επίδραση του μαγνητικού πεδίου, σημαντική είναι και απόκριση λόγω της βαρυτικής έλξης.

Για τη διατήρηση της σταθερότητας των νανωσωματιδίων υπό την επίδραση της βαρύτητας, θα πρέπει ο λόγος ανάμεσα στη θερμική ενέργεια του νανωσωματιδίου και την ενέργεια της βαρυτικής έλξης να είναι μεγαλύτερος από τη μονάδα [55-57].

Θα πρέπει δηλαδή:

$$6kT > \Delta\rho \pi d^3 g L$$

Όπου:

$\Delta\rho$ = $\rho_{\text{solid}} - \rho_{\text{liquid}}$ η πυκνότητα των νανωσωματιδίων (kg/m^3)

L = το βάθος του νανοϋγρού στο δοχείο τοποθέτησης (cm)

g = η επιτάχυνση της βαρύτητας (9.8m/s^2)

d = η διάμετρος του μαγνητικού νανωσωματιδίου (nm)

Για κάποιες ενδεικτικές τιμές των παραπάνω μεγεθών, σε έλαιο με την προσθήκη νανωσωματιδίων μαγνητίτη, προκύπτει ότι η διάμετρος του νανωσωματιδίου θα πρέπει να είναι 12nm. Να σημειωθεί ότι η ελάχιστη διάμετρος νανωσωματιδίων αυτού του τύπου, που κυκλοφορούν στο εμπόριο, είναι 10nm.

$$\Delta\rho = 5170 \text{kg/m}^3$$

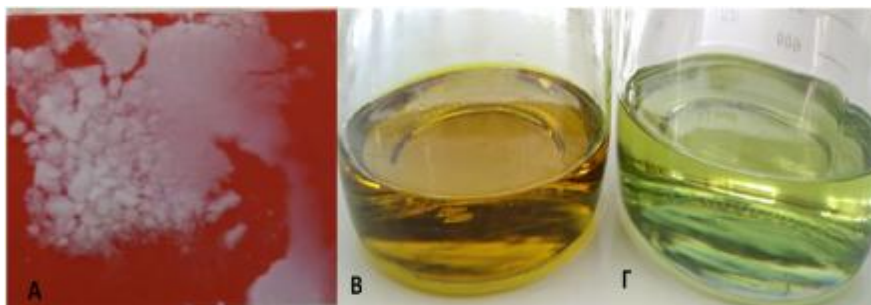
$$L = 10 \text{cm}$$

$$g = 9.8 \text{m/s}^2$$

2.5 Σύνθεση νανοελαίου με νανωσωματίδια silica (SiO_2).

Για την παρασκευή του νανοελαίου Silica η επιφανειακή τροποποίηση δεν είναι απαραίτητη λόγω της σύστασης των εγκλεισμάτων. Συγκεκριμένα τα οξείδια του πυριτίου (Silica) εμφανίζουν καλή συμπεριφορά διασποράς και ενσωματώνονται πλήρως στη μήτρα φυτικού ελαίου καθώς και πετρελαϊκού ελαίου [4]. Η δυσκολία

στην χρήση της Silica έγκειται στη διαδικασία ενσωμάτωσης των νανοσωματιδίων. Κατά την επαφή των νανοσωματιδίων Silica με τον ατμοσφαιρικό αέρα, απορροφούν μεγάλη ποσότητα υγρασίας και με μεγάλη ταχύτητα (3-4 sec από τη στιγμή της επαφής τους) συσσωματώνονται αποκτώντας μορφή συμπαγή και εν συνεχεία υαλώδη (Σχήμα Α). Για την αποφυγή της απορρόφησης της υγρασίας από τα νανοσωματίδια Silica χρησιμοποιήθηκε ασκός με γάντια (Aldrich® AtmosBag) και η διαδικασία ενσωμάτωσης των εγκλεισμάτων μέσα στη μήτρα φυτικού ελαίου διεκπεραιώθηκε μέσα σε αυτό παρουσία αζώτου. Για το νανοέλαιο Silica χρησιμοποιήθηκε συγκέντρωση 0.008% w/w με νανοσωματίδια διαμέτρου 12nm (718483 Aldrich), το μίγμα εγκλεισμάτων Silica και μήτρας φυτικού ελαίου αναδεύτηκε υπερηχητικά για πλήρη ενσωμάτωση των εγκλεισμάτων. Ενδιαφέρον επίσης παρουσίασε η χρωματική αλλαγή του νανοελαίου μετά από 150 εκκενώσεις (Σχήμα Β, Γ).[58]

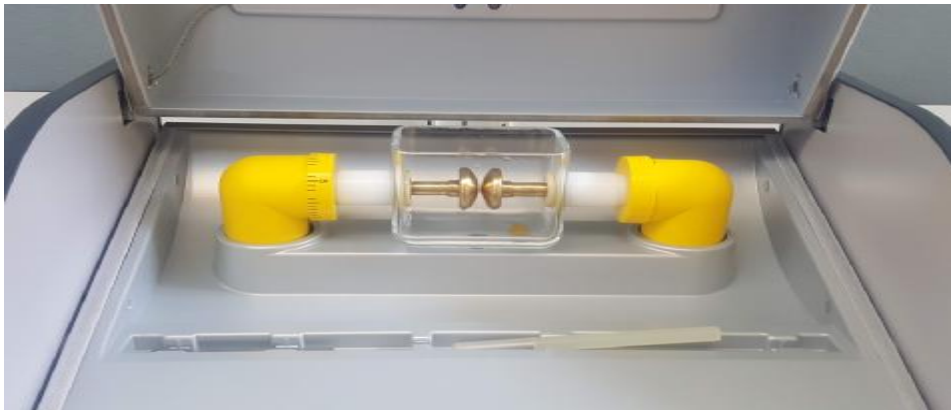


Σχήμα 2.1 Υάλωση των νανοσωματιδίων Silica (Α) και αλλαγή χρώματος νανοελαίου silica (Β-Γ) μετά από 100 διασπάσεις σε εναλλασσόμενη τάση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1 Γενικά

Η πτυχιακή εργασία έχει ως στόχο την εκπόνηση μιας πειραματικής έρευνας όπου εξετάζει την συμπεριφορά του ελαίου φυτικής προέλευσης ENVIROTEMP® FR3™ καθώς μεταβάλλουμε την περιεκτικότητα των νανοσωματιδίων silica. Γι αυτό τοποθετούμε το ρευστό μονωτικό λάδι σε διάκενο καταπονούμενο υπό γραμμικά αυξανόμενη AC τάσης. Το μόνο στοιχείο που διαφέρει στην πιστή προσομοίωση της χρήσης των μονωτικών ελαίων στους μετασχηματιστές είναι η έλλειψη των στερεών συνθετικών λεπτών μονωτικών φύλλων που υπάρχουν γύρω από τα τυλίγματα. Αυτά τα μονωτικά φύλλα στην πειραματική διάταξη τοποθετούνται μεταξύ των ηλεκτροδίων, αλλά στη συγκεκριμένη έρευνα απουσιάζουν. Ο λόγος της απουσίας τους είναι πως η έρευνα αφορά την συμπεριφορά του συγκεκριμένου φυσικού εστέρα, και όχι τη συνδυαστική χρήση του ελαίου με το μονωτικό χαρτί και τις ιδιότητες της διεπιφάνειάς τους. Για το λόγο αυτό, χρησιμοποιήσαμε μόνο του το ρευστό μονωτικό στη κυψέλη, καταγράφοντας την επίδραση των παραγόντων που το επηρεάζουν. Ο παράγοντας που εξετάστηκε είναι η διάσπαση τάσης του ελαίου και η διάταξη του διάκενου ήταν η παρακάτω :



Εικόνα 3 Διάταξη :Rogowsky-Rogowski

3.2 Χρησιμοποιηθέντα όργανα

Στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν χρησιμοποιήθηκε γραμμικά αυξανόμενη AC τάση συχνότητας 60Hz, με ρυθμό αύξησης 2 kV/s. Για την παραγωγή αλλά και τη μέτρηση της τάσης αυτής χρησιμοποιήθηκε η συσκευή BAUROilTesterDTA822-129-1 (Εικόνα 3.1), που αποτελεί μέρος του ηλεκτρομηχανικού εξοπλισμού του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων.



Εικόνα 3.1 BAUROilTesterDTA822-129-1

Στις σύνηθες δοκιμές ελαίων, μεταξύ των ηλεκτροδίων παρεμβάλλουμε μονωτικά χαρτιά, τα οποία περιέχονται και στους μετασχηματιστές και καλύπτουν τα τυλίγματα. Στόχος αυτού είναι να ερευνηθεί η μονωτική συμπεριφορά του συστήματος ελαίου-χαρτιού.

Στην εν λόγω διπλωματική εργασία μας απασχόλησε η συμπεριφορά του ελαίου καθ' αυτού, επομένως δεν εφαρμόσαμε κάποιο μονωτικό χαρτί μεταξύ των ηλεκτροδίων.

Σχετικά με την εργαστηριακή διάταξη που πραγματοποιήθηκε το πείραμα, η συσκευή BAUROilTesterDTA822-129-1, εκτός της μεγάλης ευκολίας χρήσης που παρέχει, έχει και ορισμένες άλλες πολύ χρήσιμες δυνατότητες.

Συγκεκριμένα έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Έχει μικρό όγκο και επιτρέπει εύκολο χειρισμό

- Παράγει τάσεις 0 -100 kVrms με ταχύτητες αύξησης 0,5 kV/s, 1kV/s, 2kV/sή 5kV/s
- Κύκλωμα γρήγορης ανοιχτοκύκλωσης ,ώστε να επιτυγχάνεται ταχεία σβέση του ηλεκτρικού τόξου, αποφεύγοντας έτσι το σχηματισμό παραπροϊόντων, αύξηση της θερμότητας που προκαλεί γρηγορότερη οξείδωση κ.λπ.
- Ξεκάθαρη και σίγουρη μέτρηση της τάσης διάσπασης
- Δυνατότητα ανάδευσης του μίγματος με χρήση αναδευτήρα εύκολη στη χρήση διεπαφή χρήστη
- Δυνατότητα προγραμματισμού σειράς μετρήσεων με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά και παραμέτρους
- Ειδικά εργαλεία όπως ο καθαρισμός ηλεκτροδίων (24 συνεχείς διασπάσεις σύμφωνα με διεθνή πρότυπα -IEC, BS, ASTM-ώστε να αφαιρούνται ατέλειες και προσμίξεις που μπορεί να έχουν κατακαθήσει στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων)
- Μνήμη αποθήκευσης των ειλημμένων μετρήσεων
- Προστατευτικό καπάκι με μηχανισμό ανίχνευσης της κατάστασής του (αν είναι ανοιχτό ή κλειστό) για αποφυγή ηλεκτροπληξίας του χρήστη κατά τη διάρκεια διεξαγωγής μετρήσεων
- Εύκολη και ακριβής ρύθμιση της απόστασης του διακένου (με σκάλα Vernier)

Η συσκευή BAUROilTesterDTA822-129-1 χωρίζεται σε δύο επιμέρους κομμάτια. Το πρώτο αποτελείται από τη διάταξη που πραγματοποιεί την διάσπαση, όπως το μετασχηματιστή, τα ηλεκτρόδια, την κυψέλη ελαίου και κάθε άλλη διάταξη που συντελεί στην ολοκλήρωση της διάσπασης.

Το δεύτερο αποτελείται από τη διάταξη που αφορά τη μέτρηση και παρουσίαση της τάσης διάσπασης καθώς και το σύνολο των ρυθμίσεων της διάταξης. Πρόκειται, λοιπόν, για το κύκλωμα που μεσολαβεί μεταξύ του παρατηρητή και του κυκλώματος της διάσπασης, και εκτός της μέτρησης έχει ως στόχο την προστασία του παρατηρητή από την αναπτυσσόμενη υψηλή τάση κατά τη διάσπαση. Αυτό το δεύτερο μέρος είναι το «συρτάρι» που εμπεριέχει την οθόνη, τον εκτυπωτή και τα κουμπιά χειρισμού της συσκευής.



Αφού επιλέξουμε τον επιθυμητό ρυθμό αύξησης, η συσκευή αυξάνει το πλάτος της εφαρμοζόμενης τάσης από το μηδέν, μέχρι να γίνει η διάσπαση. Η τάση διάσπασης είναι η τιμή στην οποία φτάνει η τάση τη στιγμή που το πρώτο τόξο σαρώνει το διάστημα μεταξύ των ηλεκτροδίων. Το ρεύμα κυκλοφορεί αυτόματα ,αν συμβεί ένα πλήρες τόξο. Οι σπινθηρισμοί που δεν καταλήγουν σε τόξο αγνοούνται. Αν η διάσπαση δεν έχει πραγματοποιηθεί μέχρι τα 100 kV, η συσκευή διαθέτει αυτόματο διακόπτη που διακόπτει την παροχή τάσης, μιας και τάσεις πέραν αυτής της τιμής είναι εκτός του πεδίου έρευνάς μας,αφού προσδίδει «τέλεια» μονωτική συμπεριφορά

στο ρευστό. Επίσης ο διακόπτης του κυκλώματος διακόπτει την παροχή μέσα σε 10 ms μετά την έναρξη του τόξου.

Η συσκευή έχει ρυθμιστεί, ώστε να ολοκληρώνει ένα σετ που αποτελείται από 6 εφαρμογές τάσης, με απολύτως συγκεκριμένο χρόνο χαλάρωσης του ελαίου μεταξύ των μετρήσεων. Μετά το πέρας του σετ μετρήσεων, εμφανίζονται στην οθόνη της συσκευής εκτός των ρυθμίσεων, με βάση τις οποίες πάρθηκαν οι μετρήσεις και τα κάτωθεν:

- οι 6 μετρήσεις της τάσης διάσπασης καθώς και
- η Μέση Τιμή,
- η Τυπική Απόκλιση (σ) και
- η Τυπική Απόκλιση % (σ/M) των τάσεων διάσπασης.

Επιπλέον, η συσκευή BAUROilTester παρέχει, όπως αναφέρθηκε, τη δυνατότητα εκτύπωσης των μετρήσεων και των χαρακτηριστικών της δοκιμής για μια πιο επίσημη και αξιόπιστη παρουσίαση των αποτελεσμάτων της. Στα πειράματα μας δεν κάναμε χρήση αυτής της δυνατότητας αλλά καταγράφηκαν με το χέρι.

Στη συγκεκριμένη διπλωματική εργασία, θα ασχοληθούμε με τη συμπεριφορά του ShellDialaOil. Άρα τα μέρη που θα μας απασχολήσουν είναι η κυψέλη δοκιμής και τα ηλεκτρόδια.

Η κυψέλη δοκιμής είναι φτιαγμένη από γυαλί με χωρητικότητα περίπου 500ml και κατά την λειτουργία του μηχανήματος πρέπει να παραμένει κλειστό με το κατάλληλο καπάκι.

Τα ηλεκτρόδια μπορούν είτε να είναι φτιαγμένα είτε απλά επικαλυμμένα από ορείχαλκο ή από ανοξείδωτο ατσάλι με πολύ καλά λειασμένη την επιφάνεια τους. Η μορφή τους είναι σφαιρική με διάμετρο 13.0 mm και τοποθετούνται οριζόντια, ώστε να δημιουργούν μεταξύ τους ένα διάκενο το οποίο υπολογίζεται με τη βοήθεια φίλερ (λάμων) διαφορετικού πάχους.[1]



Το μήκος του διακένου πρέπει να μετράται συχνά και να διορθώνεται, καθώς παρατηρείται μετακίνηση των ηλεκτροδίων εξαιτίας των εκκενώσεων. Όταν παρατηρηθεί κάποια εξωτερική φθορά στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων, αυτά πρέπει να αντικαθίστανται άμεσα. Η απόσταση των ηλεκτροδίων από την ελεύθερη επιφάνεια του υγρού πρέπει να είναι τουλάχιστον 40mm.



Χρησιμοποιήσαμε επίσης και τον παραπάνω φούρνο για το ένα μέρος της έρευνας. Στην πρώτη διαδικασία μας όπου θέλαμε λάδι με αφύγρανση το όργανο που μας βοήθησε να κάνουμε τουλάχιστον επιφανειακή αφύγρανση είναι ο φούρνος elvem T102 όπου αφήσαμε το λάδι στους 90 °C για μια ημέρα.



Το τελευταίο όργανο που χρησιμοποιήθηκε για την ολοκλήρωση της ερευνάς μας είναι το elmasonic S 15H όπου τοποθετώντας το λάδι με τα νανοσωματίδια εκτελεί υπερηχητική ανάδευση και αυτό οδηγεί σε μικρότερα σωματίδια και αυξημένη ομοιομορφία του μεγέθους για την αποφυγή ιζημάτων στο λάδι. Παρακάτω βλέπουμε την εργοστασιακές προδιαγραφές του μηχανήματος.

Elmasonic S 15 (H)
Ultrasonic cleaning unit

Elma Order Nos.

Elmasonic S 15 (220-240 V)	100 4626
Elmasonic S 15 (115-120 V)	100 7138
Elmasonic S 15 H (220-240 V)	100 2060
Elmasonic S 15 H (115-120 V)	100 7139
Basket stainless steel	100 4209
Cover (plastic)	100 3280
Further accessories on request	



Pictured S 15 H

The new Elmasonic S units are available in 16 different sizes ranging from 0.5 litres to 90 litres. State-of-the-art microprocessor controlled ultrasonic cleaning and sweep technology. The user-friendly LED-display ensures an excellent operation.

Further advantages:

- high-performance 37 kHz sandwich transducer systems
- cleaning tank made of cavitation-resistant stainless steel
- user-friendly and clear operating panel, splash water proof
- LED-Display showing set and remaining time of cleaning period
- Turning knob for setting continued and short-period operation from 1 to 30 min
- temperature-controlled ultrasonic operation (applies only for units with heating)
- sweep function for an optimised sound field distribution in the cleaning liquid by frequency modulation
- degas function for the efficient degassing of the cleaning liquid and for laboratory purposes
- auto degas function for automatic degassing cycles, i.e. with fresh cleaning liquids
- dry-run protected heating (applies only for units with heating)
- LED-Display for pre-set and actual temperature (applies only for units with heating)
- plug-in mains supply (S 10 – S 300H)

Technical data

Mains voltage (Vac)	115-120 V/220-240 V	Max. filling volume tank (lit. / gal.)	1.75 / 0.46
Ultrasonic frequency (kHz)	37	Weight (kg)	2.1
Power consumption total S 15 (W)	35	Material tank	stainless steel
Power consumption total S 15 H (W)	95	Material casing	stainless steel
Ultrasonic power effective (W)	35	Drain	/
Ultrasonic peak performance max.**(W)	280	Carrying handles (plastic)	/
Heating power (units w. heating) (W)	60	CE-compliant	✓
Unit outer dimensions W / D / H (mm)	175 / 160 / 212	Protection class	IP 20
Tank internal dimensions W / D / H (mm)	151 / 137 / 100		
Basket internal dimensions W/D/H (mm)	112/ 103 / 50		

** S 10 – S 15 H: impulse wave form; S 30 – S 900 H: standard sine-wave modulation.
The choice of the waveform has been matched to the relevant tank size. The signal form of the wave results in a factor 4 or 8 for the ultrasonic peak max., depending on the modulation of the wave.

Subject to technical and price changes Elma, 01/07/07

Elma Schweißtechnik GmbH · Götting-Damm-Str. 17 · D-78224 Singen · Fon: +49 (0) 7731 862-0 · Fax: +49 (0) 7731 862-266 · info@elma-ultrasonics.com
www.elma-ultrasonics.com

3.3 Μονωτικά έλαια που χρησιμοποιήθηκαν κατά της μετρήσεις

Η εταιρία Cooper Power Systems SA ανέπτυξε το φυτικό αυτό έλαιο , το οποίο αποτελείται από >98% φυτικούς πόρους και <1,5% πρόσθετα, Το έλαιο Envirotemp FR3TM, χρησιμοποιείται σε ηλεκτρολογικό εξοπλισμό , όπως μετασχηματιστές, σαν ηλεκτρομονωτικό μέσο. Τα πρόσθετα που προαναφέρθηκαν, είναι αντί-οξειδωτικές ουσίες οι οποίες έχουν προστεθεί στο έλαιο ώστε να εμποδιστεί ο σχηματισμός δεσμών των ακόρεστών λιπαρών οξέων του ελαίου με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας. Στο λάδι έχει προστεθεί χρωστική , ώστε να διαφέρει οπτικά από τα ορυκτά έλαια. Το έλαιο που χρησιμοποιείται για τη παρασκευή του προϊόντος είναι βρώσιμο και συνεπώς φιλικό για τον άνθρωπο.

Εξαιτίας του γεγονότος ότι αυτό το έλαιο παρουσιάζει υψηλό σημείο ανάφλεξης (>300°C) το οποίο έχει πιστοποιηθεί από τα εργαστήρια Underwriter (UL) και εγκριθεί από Γενικό Κέντρο Έρευνας Εργοστασίων (Factory mutual Research Center-FMRC) των Η.Π.Α., ως ένα μικρής επικινδυνότητας ανάφλεξης υλικό. Το Envirotemp FR3TM βιοδιασπάται σε ποσοστό 99% , με βάση αρκετών δοκιμών που του έχουν γίνει , όπως αυτά μετρήθηκαν από τη μέθοδο OPPTS 835.3110.

Το Envirotemp FR3TM έχει θερμοκρασία διάσπασης τους 320°C και σημείο ανάφλεξης τους 350°C, το οποίο αποδείχθηκε σε πολλές δοκιμές ανεξάρτητων εργαστηρίων στα οποία εφαρμόστηκε η δοκιμή ελέγχου ASTM D92. Τα αναλυτικά χαρακτηριστικά του ελαίου και η μοριακή δομή, φαίνονται στον πίνακα προδιαγραφών του(Πίνακας 3.1). Συνίσταται από τριγλυκερίδια, τα οποία περιέχουν διπλούς δεσμούς άνθρακα ή ακόμα και τριπλούς δεσμούς άνθρακα. Αυτός λοιπόν είναι και ο λόγος που το καθιστά βιοδιασπώμενο σε μεγάλο ποσοστό και ασταθές

στην οξειδωση. Το υγρό έχει αυτό έχει υψηλή διηλεκτρική αντοχή , και συγκεκριμένα πάνω από 56kV/2mm (μετρημένη από ASTM D1816 , με 2mm διάκενο). Το επίπεδο κορεσμού του FR3 είναι μεγαλύτερο από λαδιών όπως το Gemini X(ορυκτό έλαιο το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στην Αμερική) και υπολογίζεται περί τα 1100ppm σε τυπική θερμοκρασία(stp).[2][66]

Property	Standard Test Methods		ASTM D6611	IEC 62770	Enviotemp FR3 Fluid
	ASTM	ISO/IEC	As-Received New Fluid Property Requirements	Unused New Fluid Property Requirements	Typical
Physical					
Color	D1509	ISO 2211	≤1.0		0.5
Flash Point PMCC (°C)	D93	ISO 2719		≥250	≥55
Flash Point OOC (°C)	D92	ISO 2592	≥275		320 - 330
Fire Point (°C)	D92	ISO 2592	≥300	>300	350 - 360
Pour Point (°C)	D97	ISO 3015	≤-10	≤-10	-18 - -23
Density at 20°C (g/cm³)		ISO 3675		≤1.0	0.92
Relative Density (Specific Gravity) 15°C/15°C	D1298		≤0.96		0.92
Viscosity (mm²/sec)	D445	ISO 3104			
			≤15	≤15	7.7 - 8.3
			≤50	≤50	32 - 34
			≤500		180
Visual Examination	D1524	IEC 61099 9.2	bright and clear	clear, free from sediment and suspended matter	clear, light green
Biodegradation		OECD 301	readily biodegradable	readily biodegradable	ultimately biodegradable
Electrical					
Dielectric Breakdown (kV)	D877		≥30		47
Dielectric Breakdown (kV)					
			≥20		28
1mm gap	D1816				
2mm gap	D1816		≥35		48 - 75
2.5mm gap		IEC 60156		≥35	73
Gassing Tendency (mm³/min)	D2500		≤0		-79
Dispersion Factor					
			≤0.20		0.010 - 0.15
25°C (%)	D824			≤0.05	0.02
90°C (tan δ)		IEC 60247			0.41 - 3.85
100°C (%)	D824		≤4.0		
Chemical					
Corrosive Sulfur	D1275	IEC 62567	non-corrosive	non-corrosive	non-corrosive
Water Content (mg/kg)	D1533	IEC 60814	≤200	≤200	4 - 50
Acid Number (mg KOH/g)	D974	IEC 62021.3	≤0.08	≤0.08	0.013 - 0.042
PCB Content (mg/kg)	D4059		not detectable	free from PCBs	not detectable
Oxidation Stability (48 hrs, 120°C)		IEC 61126C			
Total Acidity (mg KOH/g)		IEC 62021.3		≤0.6	0.1
Viscosity at 40°C (mm²/sec)		ISO 3104		≤30% increase over initial	17.1
Dispersion Factor at 90°C (tan δ)		IEC 60247		≤0.5	0.1

Πίνακας 3.1 (Cooper Enviotemp FR3 datasheet specifications)



Εικόνα 3.2 FR3 που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο

3.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την έρευνα μας

3.4.1 Διάκενο

Ένας παράγοντας που εφιστά την προσοχή μας και επηρεάζει εμφανώς την συμπεριφορά του μονωτικού ελαίου είναι το μέγεθος του διακένου μας, δηλαδή η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων. Αυτό είναι λογικό καθώς μεγαλώνοντας ή μικραίνοντας την απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων, αντίστοιχα μεγαλώνει ή μικραίνει η απόσταση που πρέπει να διανύσει η εκκένωση.

Η απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρυθμίζεται χειροκίνητα με την περιστροφή μιας στρόφιγγας που μετακινεί ένα ηλεκτρόδιο προς τα εμπρός ή προς τα πίσω, ανάλογα με την φορά περιστροφής. Η ακριβής απόσταση μεταξύ των ηλεκτροδίων ρυθμίζεται με την χρήση λάμων του επιθυμητού πάχους που τοποθετούνται μεταξύ των ηλεκτροδίων. Μόλις εφάπτονται τα δύο ηλεκτρόδια με την λάμα ακούγεται μια ηχητική σήμανση και σταματάμε την περιστροφή της στρόφιγγας. Σημασία έχει οι λάμες να είναι ανοξειδωτες ώστε να μην αντιδρούν με το λάδι αλλά ούτε να αφήνουν υπολείμματα πάνω στα ηλεκτρόδια. Ανάλογα το πρότυπο που θα ρυθμίσουμε στο BAUR Oil Tester DTA 822-129-1 θα βάλουμε την ανάλογη λάμα, όπου για παράδειγμα το πρότυπο IEC 60156 θέλει διάκενο των 2,5 mm ενώ το πρότυπο ASTM D1816:2004 θέλει διάκενο των 1mm. [1]

3.4.2 Υγρασία υπό την επίδραση του χρόνου

Το νερό επίσης απορροφάται από το λάδι σε MT ισχύος και μειώνει δραματικά τη διηλεκτρική αντοχή του μονωτικού ελαίου. Στο πείραμα μας όπως θα δούμε στην συνέχεια μετρήθηκε η διάσπαση τάσης λαδιού χωρίς αφύγρανση με 0,016% περιεκτικότητα και έν συνέχεια το αφήσαμε μια βδομάδα για να δούμε την επίδραση της υγρασίας. Το σχήμα 3 δείχνει την επίδραση της υγρασίας στη διηλεκτρική αντοχή ενός ορυκτού ελαίου, η οποία μετρήθηκε με VDE (Verband Deutscher Electrotechniker) ηλεκτρόδια. Παρατηρείται λοιπόν μείωση κατά 15% της διηλεκτρικής αντοχής του ελαίου, όταν το περιεχόμενο του σε νερό φτάνει τα 10ppm, ενώ περνάει το όριο το 70% της αρχικής διηλεκτρικής αντοχής στα 20ppm. Μετά τα 20ppm, η πτώση της διηλεκτρικής αντοχής είναι σε μεγάλο βαθμό. [5] [10]

Για να καταλάβει κανείς τη σημασία του διαγράμματος δίνονται τα ακόλουθα στοιχεία:

Τα (Parts per million)ppm - είναι μια μονάδα μέτρησης για μικρές συγκεντρώσεις ρύπων στον αέρα, νερό, αίμα, κτλ. Ισούται με το πηλίκο του ρύπου προς την ουσία που βρίσκεται σε μεγαλύτερη συγκέντρωση και ορίζεται ως:

$$\text{ppm} = 1,000,000 \text{ mc} / \text{ms}$$

όπου:

mc = μάζα ρύπου (kg, lb)

ms = μάζα διαλύτη (kg, lb)

Στο μετρικό σύστημα μονάδων τα ppm μπορούν να εκφραστούν με milligram έναντι kg όπου:

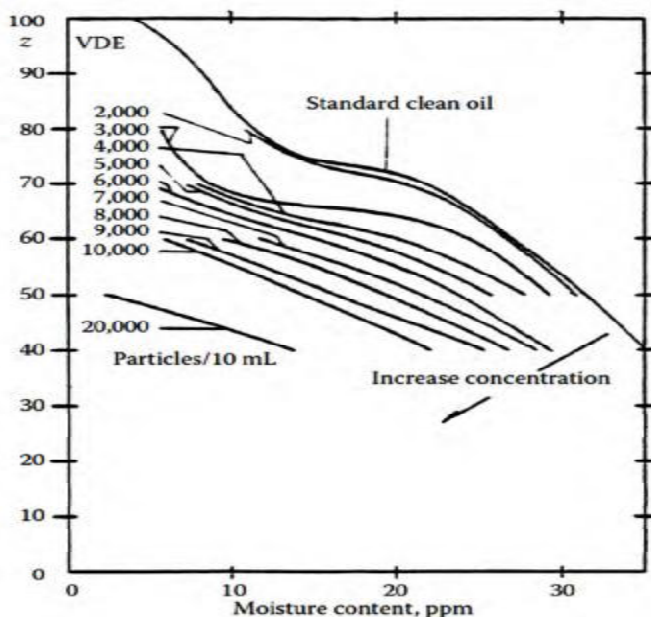
$$\square 1 \text{ mg/kg} = 1 \text{ ppm}$$

Τα ppm μπορούν να εκφραστούν και με ποσοστιαία αντιστοιχία:

$$\square 1 \text{ ppm} = 0.0001 \%$$

$$\square 1.000 \text{ ppm} = 0.1 \%$$

$$\square 10.000 \text{ ppm} = 1 \%$$



(Σχήμα 3) Αξιολόγηση της επίδρασης της επίδρασης της υγρασίας στη διηλεκτρική αντοχή διακένου ελαίου κατά VDE.

z: % αντοχή σε αναφορά με στεγνό λάδι, για διαφορετικά επίπεδα συγκεντρώσεων νερού

3.4.3 Χρόνος χαλάρωσης ελαίου

Ένας άλλος προς εξέταση παράγοντας είναι η συμπεριφορά του ελαίου σε σχέση με το χρόνο που παρεμβάλλεται μεταξύ δύο σετ μετρήσεων. Η μία άποψη αναφέρει πως οι συνεχόμενες εκκενώσεις οδηγούν στο σχηματισμό φυσαλίδων και άλλων σωματιδίων τα οποία επιδρούν αρνητικά στην μονωτική συμπεριφορά του ελαίου σε επόμενες μετρήσεις.

Να επισημάνουμε πως η συσκευή έχει ρυθμιστεί ώστε σε κάθε σετ η μέτρηση να ξεκινά μετά από κάποιο χρόνο. Στο πρότυπο IEC 60156 ο χρόνος χαλάρωσης ήταν στα 5 λεπτά ενώ αντιθέτως στο πρότυπο ASTM D1816:2004 ο χρόνος χαλάρωσης ήταν 3 λεπτά. Στην αλλαγή των σέτ όμως μετά από 5 μετρήσεις η χρόνος χαλάρωσης ήταν 10 λεπτά αυτό δεν είναι και αναγκαίο για τον ερευνητή καθώς με την αλλαγή των σέτ μπορεί να ξεκινήσει όποτε θέλει πάλι την διαδικασία αφού βέβαια περάσει ο χρόνος χαλάρωσης ο οποίος είναι υποχρεωτικός. [1]

3.4.4 Επίδραση φυσαλίδων

Σημαντικός παράγοντας προς εξέταση είναι η παρουσία φυσαλίδων στο διάκενο μεταξύ των αγώγιμων μερών.

Ασχέτως την μέθοδο άντλησης του ελαίου στην συσκευή η δημιουργία φυσαλίδων είναι αναπόφευκτη. Επίσης κατά την διάρκεια της διάσπασης η εκκένωση αποτελεί αιτία γένεσης φυσαλίδων. Γι αυτό το λόγο το κάθε σέτ μετρήσεων έχει ρυθμιστεί από το μηχάνημα να δίνει κάποιο χρόνο χαλάρωσης όπως αναφερθήκαμε παραπάνω.[1]

3.5 Διαδικασία διεξαγωγής του πειράματος

3.5.1 Μέτρα προστασίας του ελαίου και της διάταξης

Βασικοί κανόνες που ακολουθήσαμε, για να επιτύχουμε «ιδανική» συμπεριφορά του ελαίου, απαλλαγμένα από λάθη, αστοχίες του παρατηρητή σχετικά με τις προς εξέταση ιδιότητές του και αφετέρου να εξασφαλίσουμε την ασφάλεια τόσο του παρατηρητή όσο και του εξοπλισμού του εργαστηρίου Υψηλών Τάσεων.:

Χρησιμοποιούμε πάντα γάντια latex ,για να μην μολύνουμε το προς δοκιμή λάδι.

Το λάδι που δεν χρειαζόμαστε δεν το αδειάζουμε στο δίκτυο υδροδότησης αλλά σε ειδικό δοχείο.

Το μονωτικό έλαιο φυλασσόταν εντός ενός κλειστού δοχείου, το οποίο ανοιγόταν μόνο ,για να εξαχθεί η ποσότητα που ήταν απαραίτητη για την εκτέλεση της εκάστοτε δοκιμής και αμέσως επισφραγιζόταν. Αυτό μας προφύλασσε από τις αρνητικές επιπτώσεις της επαφής του ελαίου με τον ελεύθερο ατμοσφαιρικό αέρα, μειώνοντας έτσι τη συγκέντρωση υγρασίας εντός του. Επίσης, μειωμένη κατ' αυτόν τον τρόπο ήταν και η ένταση της οξειδωσής του.

Κατά την τοποθέτηση του ελαίου στην κυψέλη, πρέπει να αποφευχθεί ο σχηματισμός φυσαλίδων που ασκούν μεγάλη επίδραση στη τάση διάσπασης. Ένα μέτρο που παίρνουμε, για να το εξασφαλίσουμε αυτό, είναι να αφήσουμε το λάδι να ηρεμήσει για 10 λεπτά στην κυψέλη, πριν εκκινήσουμε τη διαδικασία των μετρήσεων, ώστε να απαλλαγεί από τυχόν φυσαλίδες αέρα.

5.3.2 Εκκίνηση της διαδικασίας μετρήσεων –προετοιμασία

Η πειραματική διαδικασία της έρευνας μας διεξήχθη στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Πατρών υπό την επίβλεψη της καθηγήτριας Ελευθερίας Πυργιώτη , του καθηγητή Βασίλειου Χαραλαμπάκου και την συνεργασία του υποψήφιου διδάκτορα Κώστα Κούτρα. Χωρίστηκε σε δύο μέρη ,το πρώτο διεξήχθη τον Ιούλιο για την δοκιμή μονωτικών ελαίων με αφύγρανση και το δεύτερο μέρος τον Σεπτέμβριο με μονωτικά έλαια χωρίς αφύγρανση. Παρακάτω θα εξηγήσουμε την διαδικασία που κάναμε βήμα βήμα :

1) Με την είσοδο μας στο εργαστήριο Υψηλών Τάσεων το πρώτο πράγμα που κάναμε ήταν να καθαρίσουμε όλα τα δοχεία και την κυψέλη της συσκευής που θα χρησιμοποιούσαμε . η διαδικασία αυτή απαιτεί τουλάχιστον ένα 24ωρο. Αρχικά με την χρήση γαντιών από latex πήραμε ένα σφουγγάρι και σαπούνι και τα καθαρίσαμε σε καυτό νερό, έπειτα προσθέσαμε μεθανόλη στα δοχεία κάνοντας ένα καλό πλύσιμο (ανακάτεμα) .Τέλος τα αφήσαμε να στραγγίξουν ένα 24ωρο. Η ίδια διαδικασία γίνεται πάντοτε στο πλύσιμο των υλικών μας μετά από κάθε πείραμα. Όταν προσθέσαμε τα νανοσωματίδια silica απαιτούνταν παραπάνω προσοχή.



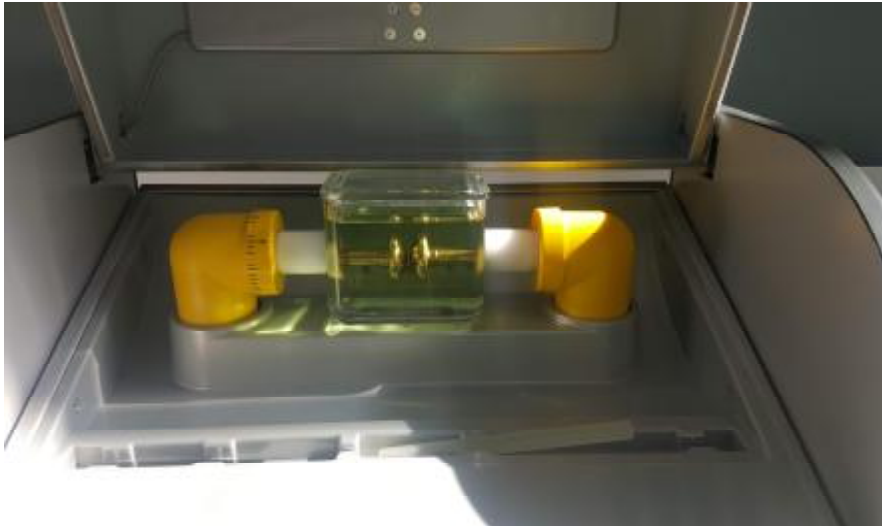
Εικόνα 3.3 Δοχεία που χρησιμοποιήσαμε

2) Ανοίγουμε με προσοχή το δοχείο που περιέχει το έλαιό μας , βάζοντας ένα δοχείο σταθερό στο έδαφος ρίξαμε με προσοχή την ποσότητα που θέλαμε .Και στα δύο μέρη της ερευνάς μας χρειαστήκαμε συνολικά 800ml μονωτικού φυτικού ελαίου της εταιρίας Envirotemp® FR3™ για το κάθε μέρος .



Εικόνα 3.4 FR3 που χρησιμοποιήθηκε στο εργαστήριο

3) Η πρώτη μέτρησή μας έγινε με το πρότυπο IEC 60156. Πήραμε από την συσκευή μας την κυψέλη ανοίξαμε το καπάκι και την μεταφέραμε σε μέρος ασφαλές .Έπειτα με την χρήση γαντιών από latex πάντοτε συνεχίσαμε ,όπου από το δοχείο το οποίο περιείχε το λάδι που είχαμε ρίξει προηγουμένως γεμίσαμε την κυψέλη με λάδι καλύπτοντας πλήρως τα ηλεκτρόδια και προσέχοντας να μην την γεμίσουμε μέχρι πάνω πάνω για να αποφύγουμε την υπερχειλίση. Αφού τοποθετήσαμε πάλι την κυψέλη στην συσκευή μας κλείσαμε το καπάκι προστασίας της για να μην διαβρωθεί από τον ατμοσφαιρικό αέρα ή πέσουν μέσα ρύποι.



Εικόνα 3.5 Κυψέλη συσκευής

4) Το επόμενο βήμα ήταν να ρυθμίσουμε τον τρόπο λειτουργίας της συσκευής BAUR OIL TESTER DTA 822-129-1. Πρώτα ανάλογα το πρότυπο μας θα ρυθμίσουμε το μέγεθος του διάκενου ,στην πρώτη περίπτωση με το πρότυπο IEC 60156 που χρησιμοποιήσαμε το ρυθμίσαμε στα 2,5 mm. Η ακριβής ρύθμιση γίνεται με το filler όπου το τοποθετούμε ανάμεσα στα ηλεκτρόδια και καθώς πλησιάζουν το ένα στο άλλο με την περιστροφή μιας στρόφιγγας και ακουμπήσουν στο filler ακούγεται ένας χαρακτηριστικός ήχος.

5)



Εικόνα 3.6 Filler 2,5mm :Το χρησιμοποιήσαμε για το πρότυπο IEC 60156



Εικόνα 3.7 Filler 1,00mm :Το χρησιμοποιήσαμε για το πρότυπο ASTM D1816:2004

Ορίσαμε χρήση ρυθμίσεων IEC και είχαμε τις εξής παραμέτρους:

- Εύρος τάσης δοκιμής : 0 –100 kVrms
- Συχνότητα AC τάσης : 60 Hz
- Αύξηση τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης δοκιμής : 2 kV/sec
- 6 διασπάσεις ανά σετ
- 10 λεπτά διάλειμμα μεταξύ των σετ μετρήσεων
- 5 λεπτά διάλειμμα μεταξύ των διασπάσεων του ίδιου σετ

Επειδή οι μετρήσεις που βγήκαν με το παραπάνω πρότυπο ήταν πολύ μεγάλες και ξεπερνούσαν το εύρος τάσης δοκιμής 0-100 KV αλλάξαμε το πρότυπο που θα χρησιμοποιούσαμε στις μετρήσεις μας . Το πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε στην υπόλοιπη ερευνά μας ήταν το ASTM D1816:2004 όπου το μέγεθος του διάκενου ήταν 1,00mm και ορίσαμε τις παρακάτω ρυθμίσεις :

- Εύρος τάσης δοκιμής : 0 –100 kVrms
- Συχνότητα AC τάσης : 60 Hz
- Αύξηση τιμής της εφαρμοζόμενης τάσης δοκιμής : 2 kV/sec
- 5 διασπάσεις ανά σετ
- 5 λεπτά διάλειμμα μεταξύ των σετ μετρήσεων
- 3 λεπτά διάλειμμα μεταξύ των διασπάσεων του ίδιου σετ

Τα σετ που πήραμε στα δύο παραπάνω πρότυπα ήταν 6 και 7 αντιστοίχως.

6) Εφαρμόζουμε το ειδικό πρόγραμμα καθαρισμού ηλεκτροδίων (Tool s=> Electrode Cleaning), κατά το οποίο διεξάγεται μία σειρά 24 συνεχόμενων διασπάσεων (υπό ταχέως αυξανόμενη τάση), όπως απαιτούν διεθνή πρότυπα (IEC, BS, AS) δοκιμών σε λάδια, ώστε να αφαιρεθούν τυχόν ατέλειες και προσμίξεις που έχουν κατακαθίσει στην επιφάνεια των ηλεκτροδίων. Τα αποτελέσματα αυτά δεν καταγράφονται ούτε από τον παρατηρητή ούτε αποθηκεύονται στη μνήμη του BAUR OilTester, γιατί εκτός ότι γίνονται με γρήγορο ρυθμό, δεν αποτελούν στοιχεία έρευνας αλλά μέσο καθαρισμού των ηλεκτροδίων.

7) Στο πρώτο μέρος της ερευνάς μας πήραμε μετρήσεις σε έλαιο με αφύγρανση . Ο τρόπος για να κάνουμε αφύγρανση γίνεται στο εργαστήριο με τον φούρνο που διαθέτει. Πήραμε το λάδι που είχαμε στο δοχείο μας και τα 800ml και το αφήσαμε στους 90° C για μια μέρα έτσι ώστε να φύγει η υγρασία αλλά βέβαια δεν είναι πλήρης διαδικασία γιατί γίνεται μόνο επιφανειακή αφύγρανση ενώ η υγρασία που είναι μέσα στο υγρό παραμένει.



Εικόνα 3.8 Φούρνος elvem T102

8) Την επόμενη μέρα αφότου έγινε η αφύγρανση ξεκινήσαμε την ερευνά μας κάνοντας αρχικά 7 σετ μετρήσεων για το μονωτικό φυτικό λάδι με αφύγρανση έχοντας πάντοτε πρότυπο ASTM D1816:2004 .

Στο κάθε σετ γίνονται 5 διασπάσεις όπου στο τέλος κάθε μίας σημειώνουμε και τις εξής πληροφορίες:

- η Μέση Τιμή,(mean value)
- η Τυπική Απόκλιση (σ) (stand deviation) και
- η Τυπική Απόκλιση % (σ/M) των τάσεων διάσπασης (Stand deviation/mean value)

9) Η προσθήκη νανοσωματιδίων στο φυτικό μονωτικό λάδι μας είναι η επόμενη διαδικασία της έρευνα. Τα νανοσωματίδια που προσθέσαμε στο λάδι μας είναι σιλικόνης (silica) .



Εικόνα 3.9 Νανοσωματίδια SILICA

Η ανάμειξη έγινε στο τμήμα της επιστήμης των υλικών με υπερηχητική ανάδευση από φοιτητές του τμήματος. Πρέπει να αναφέρουμε ότι τα νανοσωματίδια silica τα οποία εμφανίζουν δυσκολία στη διαδικασία ενσωμάτωσης. Κατά την επαφή των νανοσωματιδίων Silica με τον ατμοσφαιρικό αέρα, απορροφούν μεγάλη ποσότητα υγρασίας και με μεγάλη ταχύτητα (3-4 sec από τη στιγμή της επαφής τους)

συσσωματώνονται αποκτώντας μορφή συμπαγή και εν συνεχεία υαλώδη και συνήθως η διαδικασία γίνεται σε περιβάλλον αζώτου. Στην συγκεκριμένη διαδικασία τα νανοσωματίδια εκτέθηκαν σε ατμοσφαιρικό αέρα. Στην συνέχεια έγινε υπερηχητική ανάδευση με το λάδι στην συσκευή elma S 15H. Τελικά η περιεκτικότητα που φτιάξαμε ήταν 0,032%.



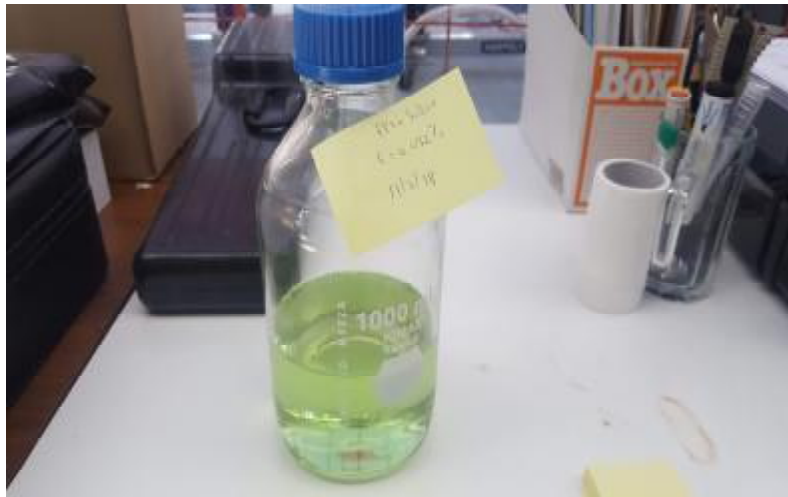
Εικόνα 3.10 Συσκευή elma S 15H

Η ποσότητα ελαίου που πήραμε για να κάνουμε την ενσωμάτωση ήταν 500ml αλλά στο εργαστήριο χρησιμοποιήσαμε 400ml για να ξεκινήσουμε την έρευνα μας. Επίσης η ποσότητα των νανοσωματιδίων που πήραμε για να κάνουμε την ενσωμάτωση ήταν 160 mg. Η περιεκτικότητα που ξεκινήσαμε ήταν 0,032% .

10) Στην συνέχεια αφότου πραγματοποιήσαμε τις διαδικασίες όπως και στις παραπάνω μετρήσεις για να ξεκινήσουμε τα σετ μετρήσεων, ξεκινήσαμε 7 σετ των 5 μετρήσεων για το καθένα και καταγράφοντας επίσης τις εξής πληροφορίες:

- η Μέση Τιμή,(mean value)
- η Τυπική Απόκλιση (σ) (stand deviation) και
- η Τυπική Απόκλιση % (σ/M) των τάσεων διάσπασης (Stand deviation/mean value)

Το μονωτικό φυτικό έλαιο με αφύγρανση που χρησιμοποιήσαμε είχε περιεκτικότητα 0,032%.



Εικόνα 3.11 Φυτικό έλαιο με αφύγρανση

Η αρχική ποσότητα όπου πήραμε για να γίνει ενσωμάτωση των νανοσωματιδίων ήταν 500ml. Στο εργαστήριο όμως ξεκινήσαμε σαν ποσότητα αναφοράς με 400ml. Οπότε είχαμε 400 ml με 0,032% περιεκτικότητα.

Εκτός όμως αυτής της περιεκτικότητας νανοσωματιδίων πήραμε μετρήσεις και για 0,028% - 0,024% - 0,020% - 0,016% - 0,012% - 0,008% - 0,004% .

Για να μπορέσουμε να δημιουργήσουμε αυτές τις αναλογίες προσθέταμε φυτικό έλαιο και έτσι μειωνόταν η περιεκτικότητα, πιο συγκεκριμένα φαίνεται παρακάτω:

$$V1 \cdot C1 = V2 \cdot C2$$

V1=όγκος αναφοράς (θα είναι πάντα 400 ml)

V2=όγκος υγρού

C1=χωρητικότητα της προηγούμενης μέτρησης

C2= χωρητικότητα που θέλουμε

- 400 ml 0,032%
- $V1 \cdot C1 = V2 \cdot C2 \rightarrow 400 \cdot 0,032 = V2 \cdot 0,028 \rightarrow V2 = 457 \text{ ml}$

Έτσι θα προσθέσουμε στο έλαιο μας +57ml .Στην επόμενη περίπτωση για να βρούμε πόσο έλαιο θα προσθέσουμε θα αφαιρέσουμε τα 57ml και θα έχουμε πάλι σαν όγκο αναφοράς τα 400ml . Αυτό θα γίνεται για όλες τις υπόλοιπες μετρήσεις. Δηλαδή θα αφαιρούμε την κατάλληλη ποσότητα για να πεφτουμε πάντα στα 400 ml

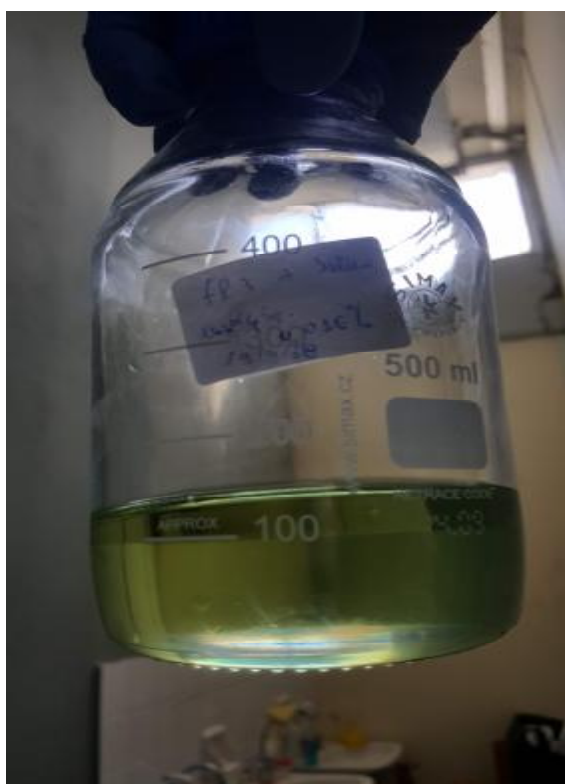
- $V1 \cdot C1 = V2 \cdot C2 \rightarrow 400 \cdot 0,028 = V2 \cdot 0,024 \rightarrow V2 = 466 \text{ ml}$ (-57ml) (+66ml)
- $V1 \cdot C1 = V2 \cdot C2 \rightarrow 400 \cdot 0,024 = V2 \cdot 0,020 \rightarrow V2 = 480 \text{ ml}$ (-66ml) (+80ml)
- $V1 \cdot C1 = V2 \cdot C2 \rightarrow 400 \cdot 0,020 = V2 \cdot 0,016 \rightarrow V2 = 500 \text{ ml}$ (-80ml) (+100ml)
- $V1 \cdot C1 = V2 \cdot C2 \rightarrow 400 \cdot 0,016 = V2 \cdot 0,012 \rightarrow V2 = 533 \text{ ml}$ (-100ml) (+133ml)
- $V1 \cdot C1 = V2 \cdot C2 \rightarrow 400 \cdot 0,012 = V2 \cdot 0,008 \rightarrow V2 = 600 \text{ ml}$ (-133ml) (+200ml)
- $V1 \cdot C1 = V2 \cdot C2 \rightarrow 400 \cdot 0,008 = V2 \cdot 0,004 \rightarrow V2 = 800 \text{ ml}$ (-200ml) (+400ml)

Στην τελευταία περίπτωση με την περιεκτικότητα των 0,004% χρησιμοποιήσαμε 770ml διότι μας έλειπαν 30ml.

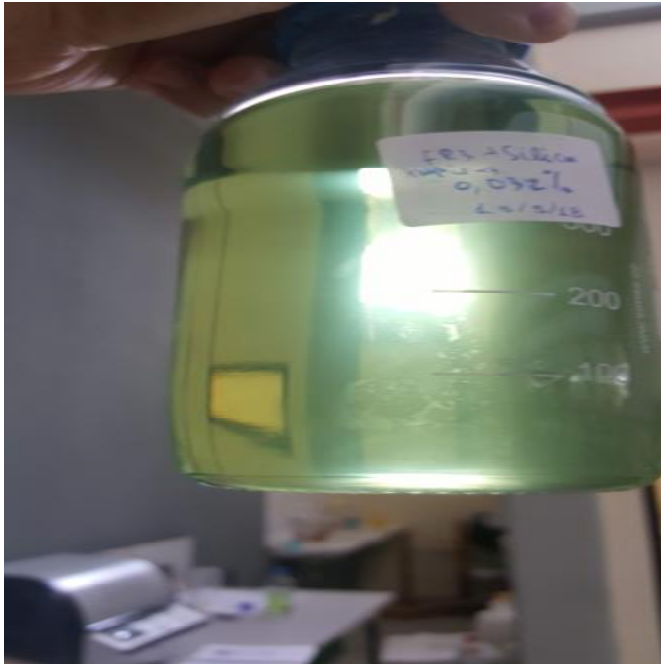
11) Αφού τελειώσαμε τα σερ μετρήσεων για μονωτικό φυτικό έλαιο με αφύγρανση με νανοσωματίδια silica τον Ιούλιο ήρθαμε πάλι στο εργαστήριο υψηλών τάσεων τον Σεπτέμβρη για να συνεχίσουμε το 2^ο μέρος της ερευνάς μας όπου είναι πάλι για

μέτρηση διάσπασης τάσης μονωτικού φυτικού ελαίου με silica με την διαφορά τώρα ότι δεν θα γίνει αφύγρανση στο μονωτικό έλαιο.

Στις μετρήσεις όμως του Ιουλίου παρατηρήσαμε ότι οι συνεχόμενες μετρήσεις στο μονωτικό έλαιο επηρεάζουν κατά πολύ την διάσπαση του έτσι αποφασίσαμε να χωρίσουμε το μονωτικό έλαιο σε δύο κατηγορίες. Ξεχωρίσαμε δύο ποσότητες των 500ml όπου στην πρώτη ενσωματώσαμε τα νανοσωματίδια με περιεκτικότητα 0,032% και βάλουμε 160 mg silica ενώ στην δεύτερη ποσότητα ενσωματώσαμε 80 mg silica και είχαμε περιεκτικότητα 0,016 %. Αυτό το κάναμε για να έχει λιγότερη καταπόνηση το έλαιο μας και να μας δείξει όσο το δυνατόν καλύτερα αποτελέσματα. Στο εργαστήριο του τμήματος της επιστήμης των υλικών δεν έγινε καλή ανάδευση του μονωτικού φυτικού ελαίου για την περιεκτικότητα του 0,032% διότι δεν το αφήσαμε αρκετή ώρα στο μηχάνημα όπου γίνεται η υπερηχητική ανάδευση και παρατηρήσαμε ότι είχε αρκετό ίζημα. Ενώ αντιθέτως το μονωτικό φυτικό έλαιο με περιεκτικότητα 0,016% δεν είχε ίζημα .



Εικόνα 3.12 Μονωτικό φυτικό έλαιο με νανοσωματίδια silica 80 mg (0,016%) όπου η ανάδευση ήταν επιτυχής.



Εικόνα 3.13 Μονωτικό φυτικό έλαιο με νανοσωματίδια silica 160mg (0,032%) όπου η ανάδευση δεν ήταν επιτυχής.

Τελικά την ποσότητα με το ίζημα δεν την χρησιμοποιήσαμε στην ερευνά μας διότι τα σετ μετρήσεων είχαν πολύ χαμηλή τάση διάσπασης λόγω της κακής ανάδευσης και πήραμε μετρήσεις μόνο για την περιεκτικότητα 0,016%. Επίσης εξετάσαμε και την επίδραση της υγρασίας αφού πήραμε σετ μετρήσεων για 0,016% ,αφήσαμε το έλαιο μια βδομάδα σε προστατευόμενο χώρο έτσι ώστε να μην εκτίθεται σε φως η ατμοσφαιρικό αέρα και ξαναπήραμε σετ μετρήσεων για την ίδια περιεκτικότητα. Οι αναλογίες ml και περιεκτικότητας είναι οι εξής:

- 400 ml 0,016%
- $V1 \cdot C1 = V2 \cdot C2 \rightarrow 400 \cdot 0,016 = V2 \cdot 0,012 \rightarrow V2 = 533\text{ml}$ (-100ml) (+133ml)
- $V1 \cdot C1 = V2 \cdot C2 \rightarrow 400 \cdot 0,012 = V2 \cdot 0,008 \rightarrow V2 = 600\text{ml}$ (-133ml) (+200ml)
- $V1 \cdot C1 = V2 \cdot C2 \rightarrow 400 \cdot 0,008 = V2 \cdot 0,004 \rightarrow V2 = 800\text{ml}$ (-200ml) (+400ml)

Οι διαδικασίες για να γίνουν τα σετ μετρήσεων είναι ίδιες με τις παραπάνω από τα προηγούμενα βήματα.

3.6 Αποτελέσματα-Γραφικές

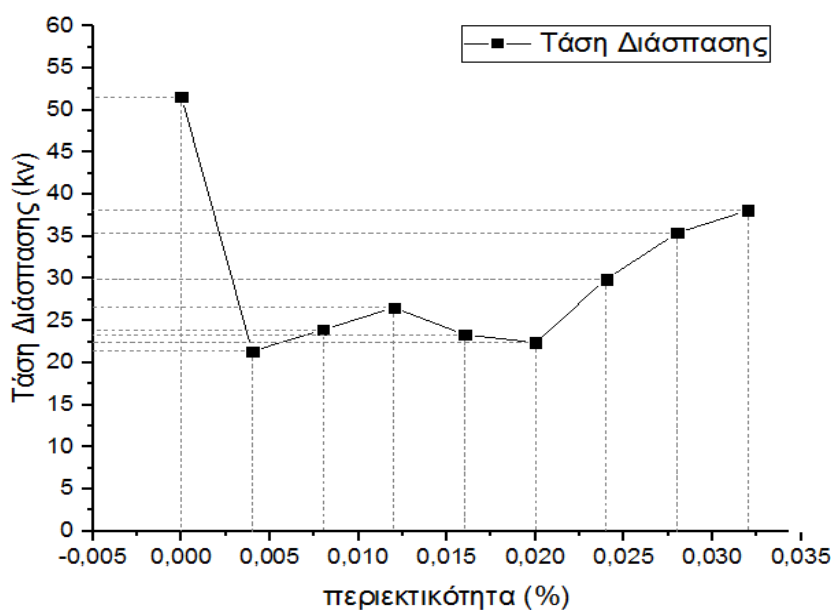
Μετά το τέλος όλων των μετρήσεων μας πήραμε όλες τις τιμές των διασπάσεων και τις επεξεργαστήκαμε στο πρόγραμμα ORIGIN . Η επεξεργασία μας έγινε μόνο για το πρώτο μέρος των πειραμάτων δηλαδή για το μονωτικό έλαιο με αφύγρανση διότι στην πράξη δεν υπάρχει περίπτωση να βρεθεί το έλαιο σε περιβάλλον χωρίς να επηρεάζεται έστω και λίγο από υγρασία. Από το πρόγραμμα κάνοντας στατιστική ανάλυση για την κάθε περιεκτικότητα καταφέραμε να πάρουμε την Μέση τιμή και την Τυπική απόκλιση για την κάθε μια οι οποίες φαίνονται αναλυτικά στον παρακάτω πίνακα :

Περιεκτικότητα% Concentration	Μέση Τιμή (KV) Mean Value	Τυπική Απόκλιση(KV) Standard Deviation
Base oil	51,6	4,37721
0,004%	21,37429	5,08275
0,008%	23,91429	3,80651
0,012%	26,54286	4,69043
0,016%	23,35143	3,62981
0,020%	22,40857	6,33317
0,024%	29,92571	6,97999
0,028%	35,41143	6,78488
0,032%	38,10286	6,75123

Πίνακας 3.2

Το ORIGIN μας παρείχε και την δυνατότητα να βγάλουμε και κάποιες γραφικές παραστάσεις ώστε να έχουμε μια πιο ολοκληρωμένη άποψη για τα αποτελέσματα μας βλέποντας τις διαφορές-διακυμάνσεις στις τιμές σε κάθε μέτρηση. Η στατιστική μας ανάλυση έγινε κατά weibull και normal κατανομή.

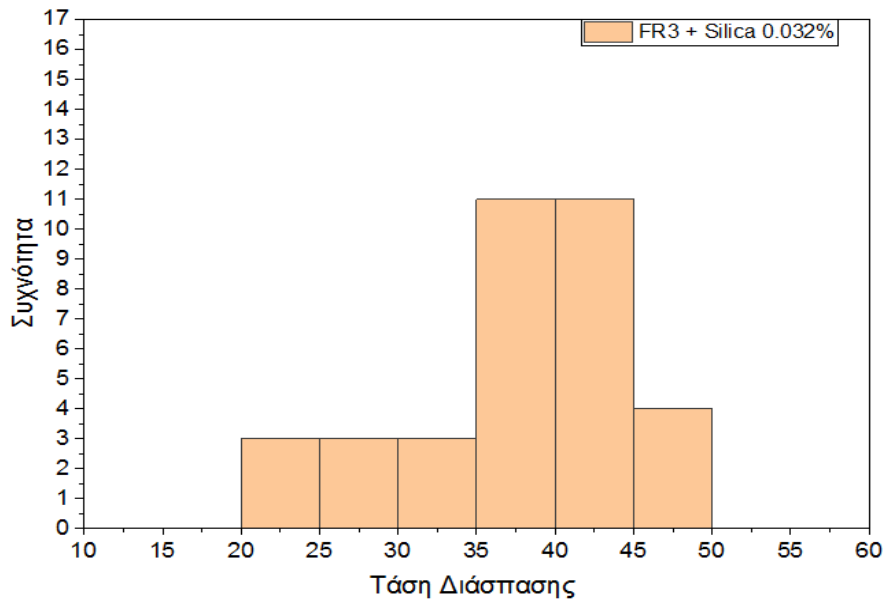
Στην παρακάτω γραφική βλέπουμε την Μέση τιμή σε κάθε περιεκτικότητα που εξετάσαμε :



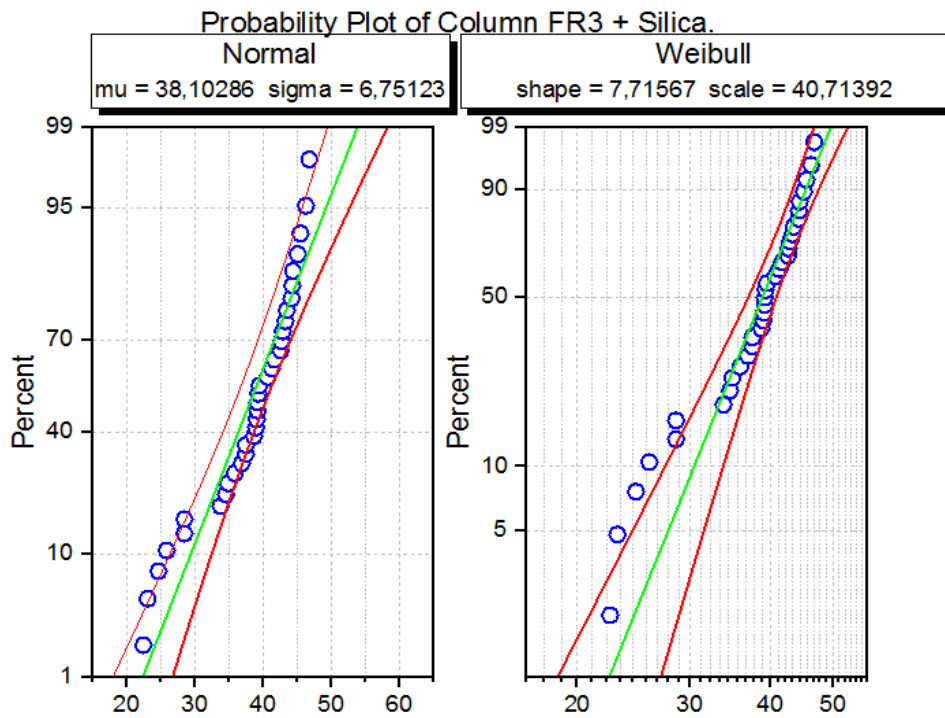
Σχήμα 3.2 Γραφικές παραστάσεις για κάθε περιεκτικότητα

Εν συνέχεια θα δούμε τις γραφικές παραστάσεις για κάθε περιεκτικότητα και επίσης τις πιθανότητα διάσπασης για 10% και 50%.

Περιεκτικότητα 0,032%



Σχήμα 3.3

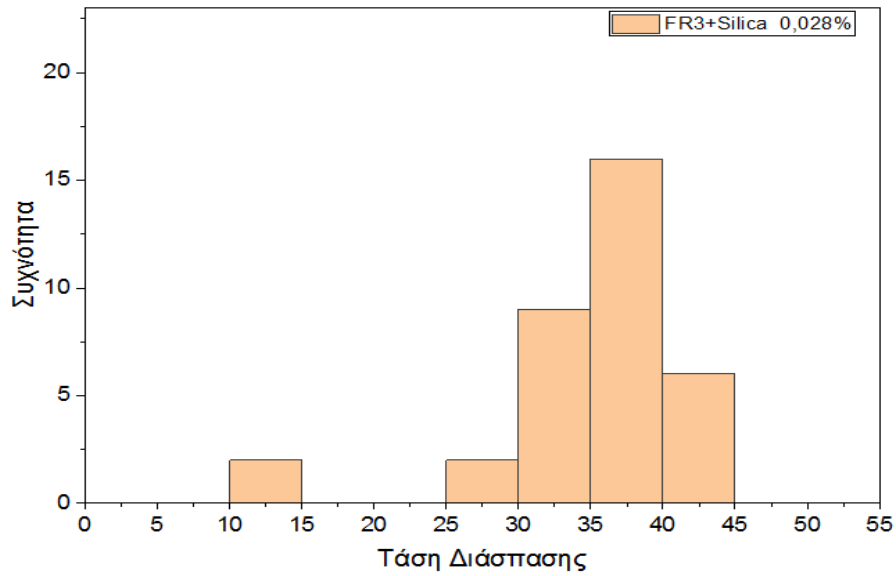


Σχήμα 3.4

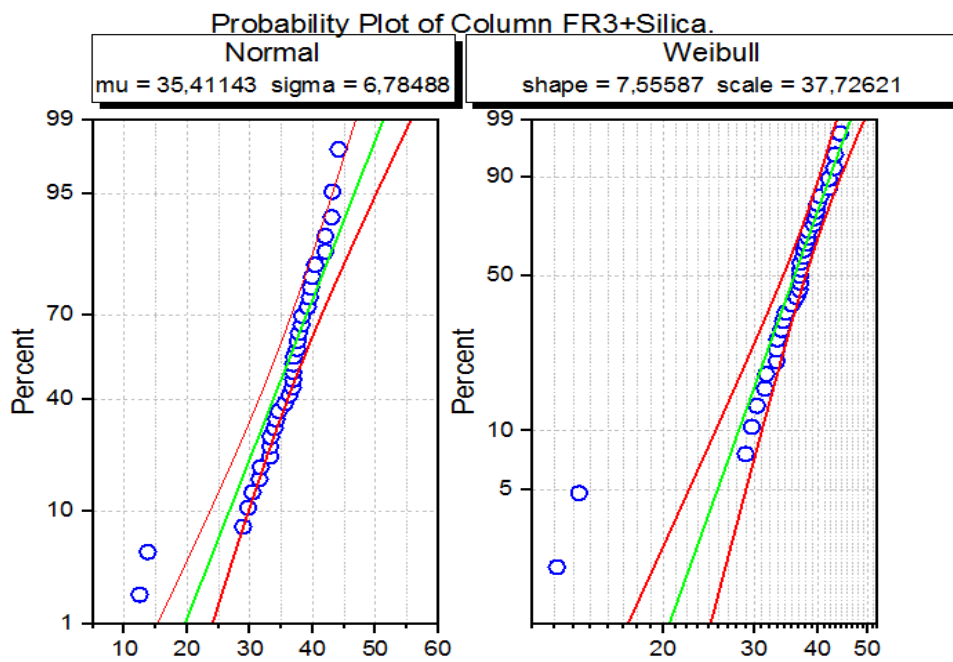
τάση Διάσπασης	Weibull	Normal
V ₁₀	30,45	29,46
V ₅₀	38,83	38,12

Πίνακας 3.3

Περιεκτικότητα 0,028%



Σχήμα 3.5

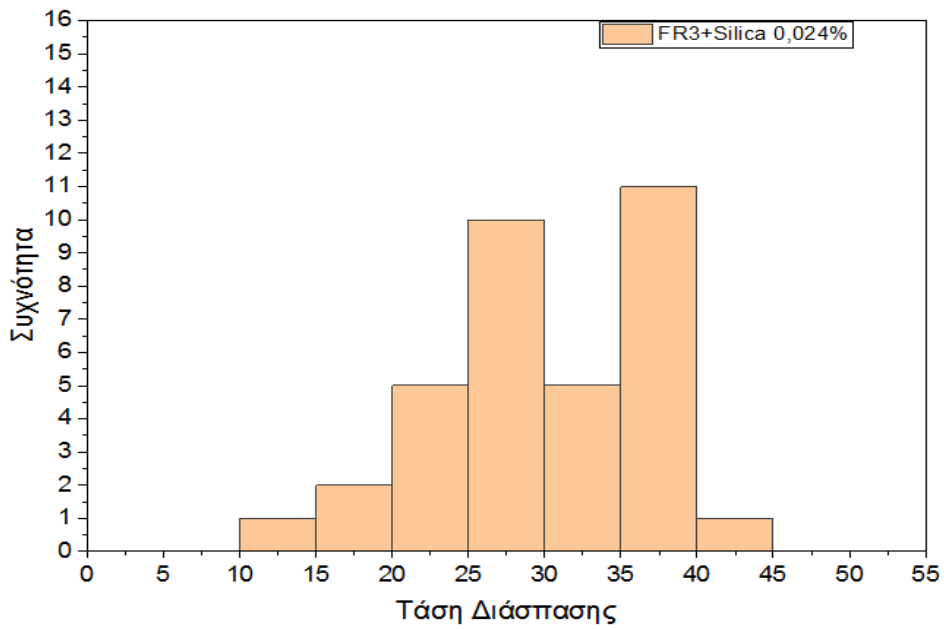


Σχήμα 3.6

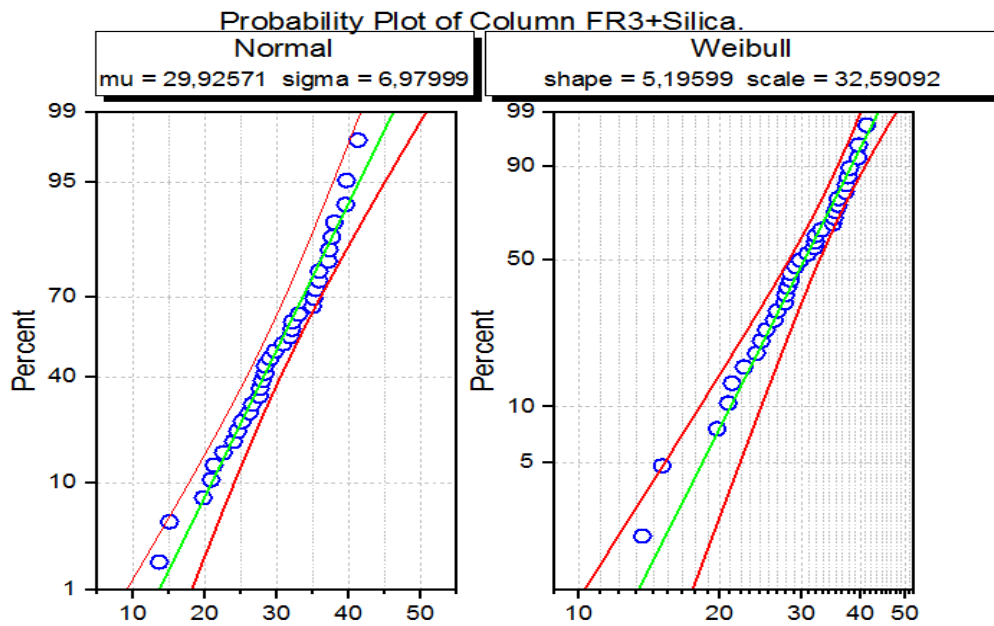
Τάση Διάσπασης	Weibull	Normal
V_{10}	28,01	26,75
V_{50}	35,94	35,42

Πίνακας 3.4

Περιεκτικότητα 0,024%



Σχήμα 3.7

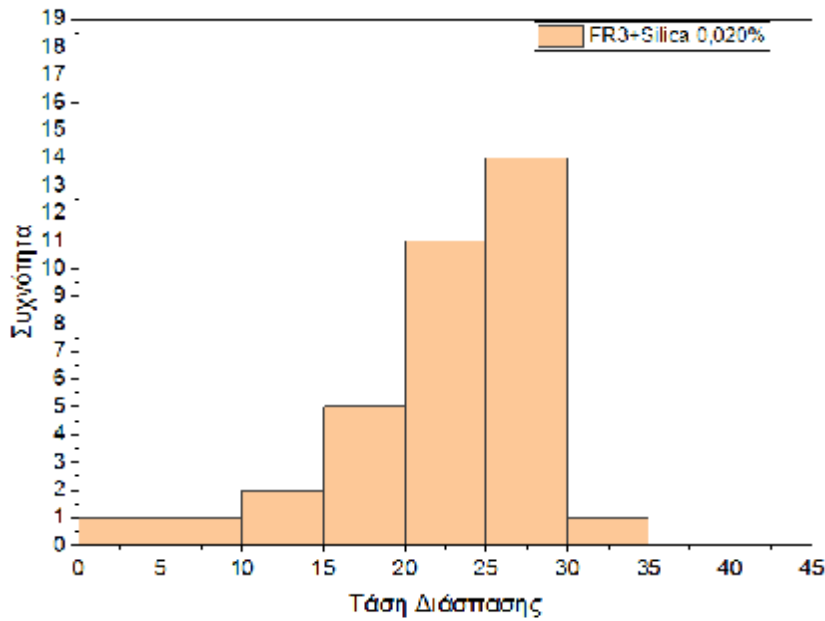


Σχήμα 3.8

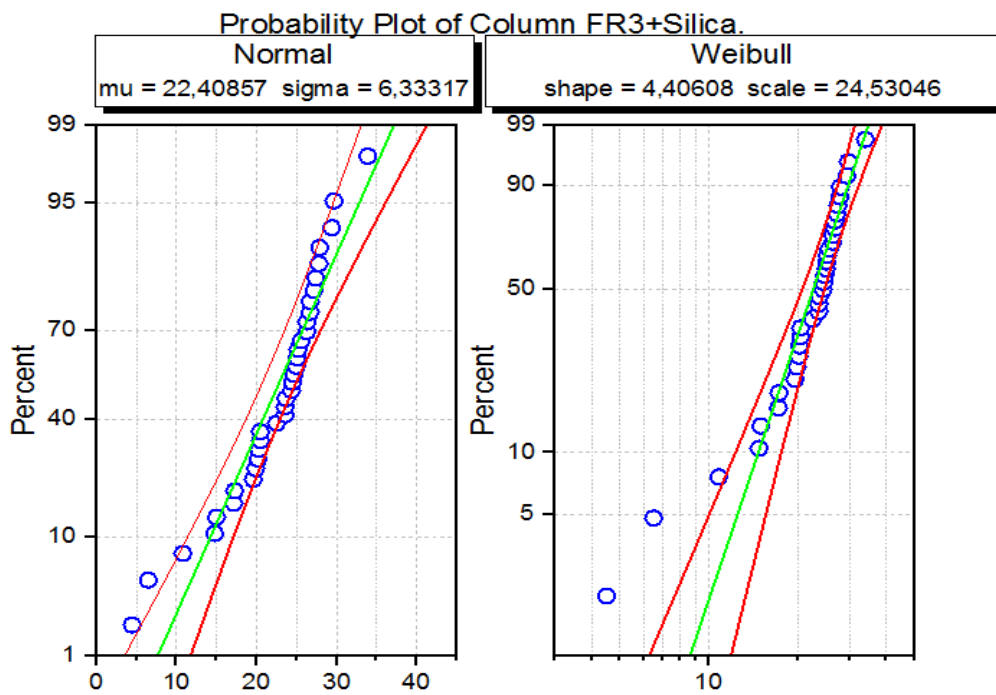
Τάση Διάσπασης	Weibull	Normal
V ₁₀	21,14	21
V ₅₀	30,38	29,93

Πίνακας 3.4

Περιεκτικότητα 0,020%



Σχήμα 3.9

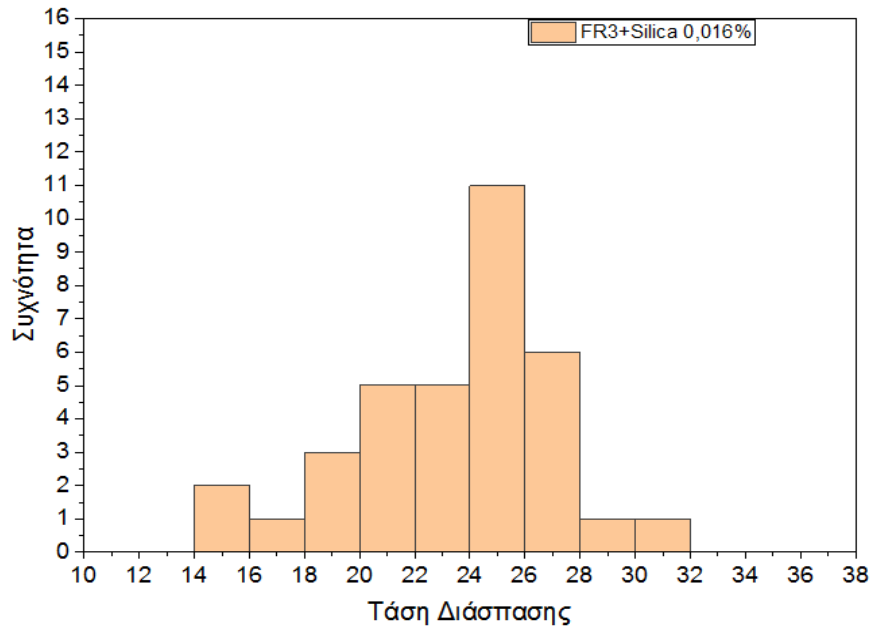


Σχήμα 3.10

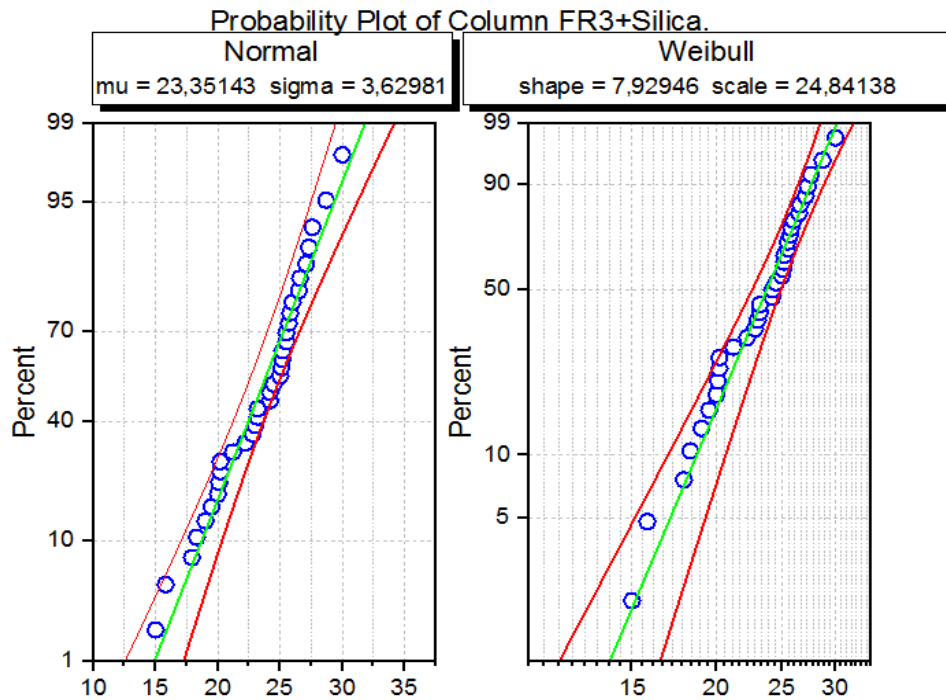
Τάση Διάσπασης	Weibull	Normal
V_{10}	14,72	14,3
V_{50}	22,58	22,41

Πίνακας 3.5

Περιεκτικότητα 0,016%



Σχήμα 3.11

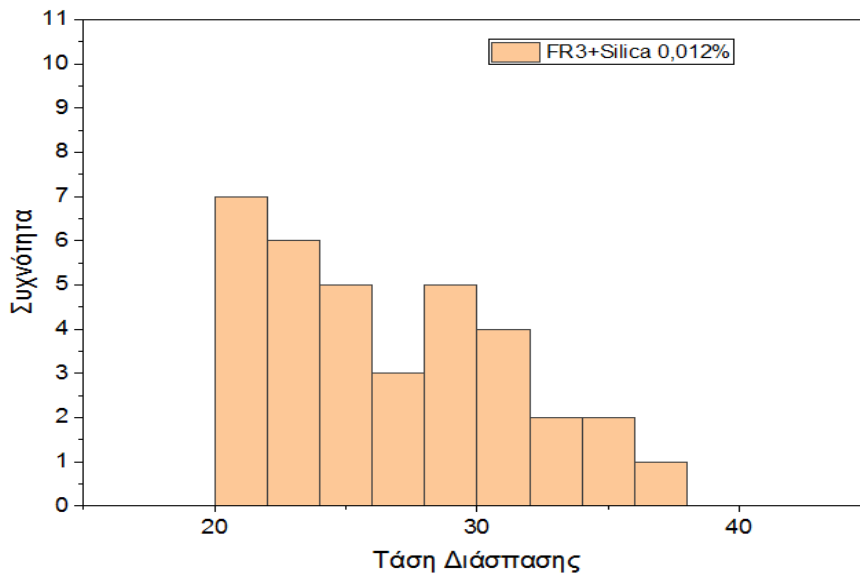


Σχήμα 3.12

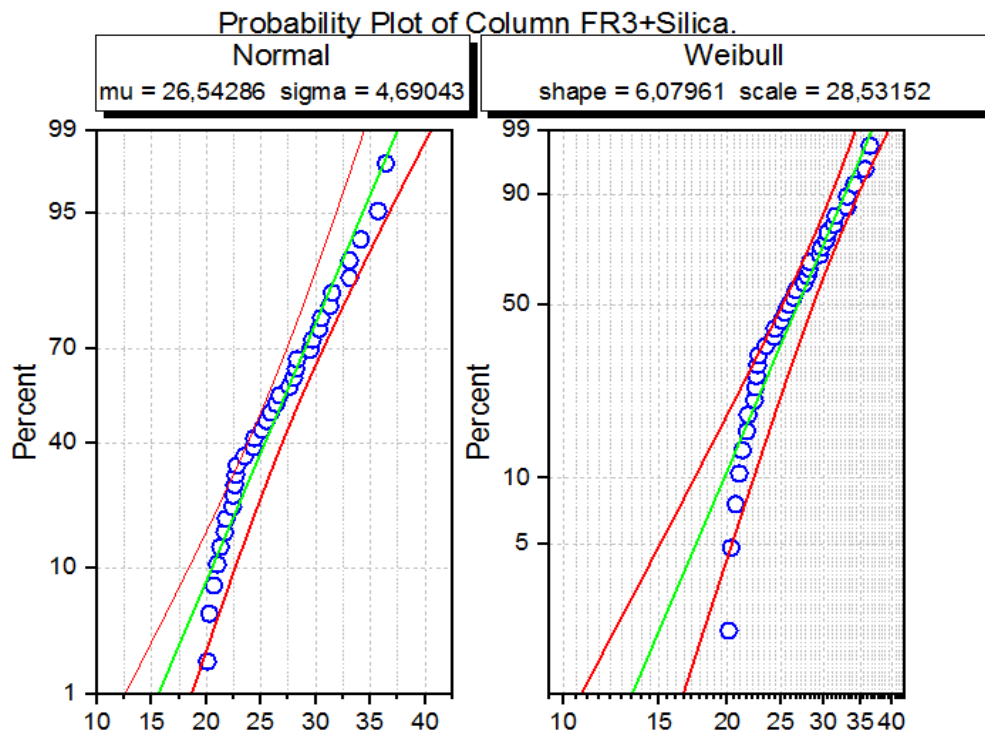
Τάση Διάσπασης	Weibull	Normal
V ₁₀	18,71	18,7
V ₅₀	23,72	23,36

Πίνακας 3.6

Περιεκτικότητα 0,012%



Σχήμα 3.13

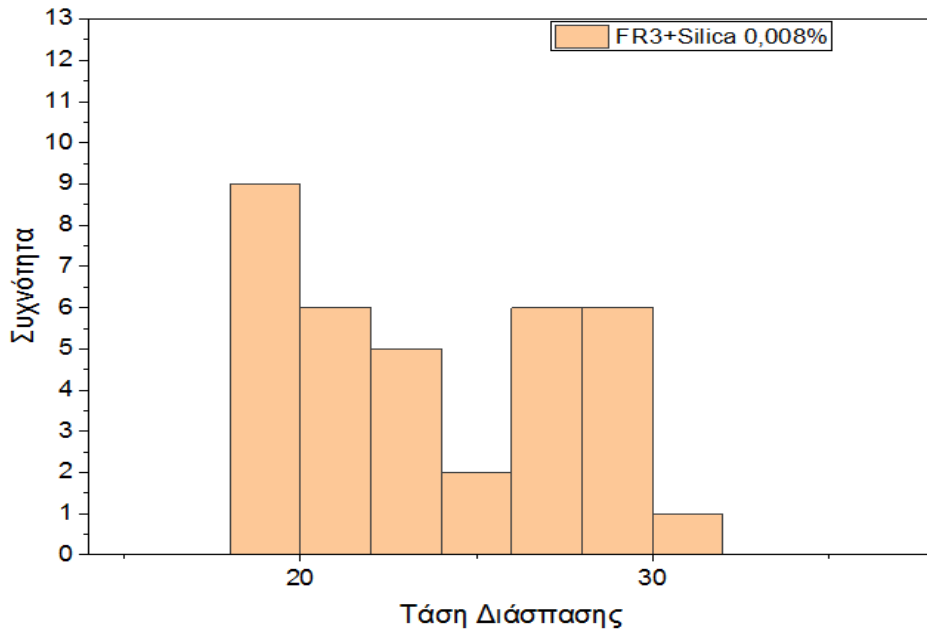


Σχήμα 3.14

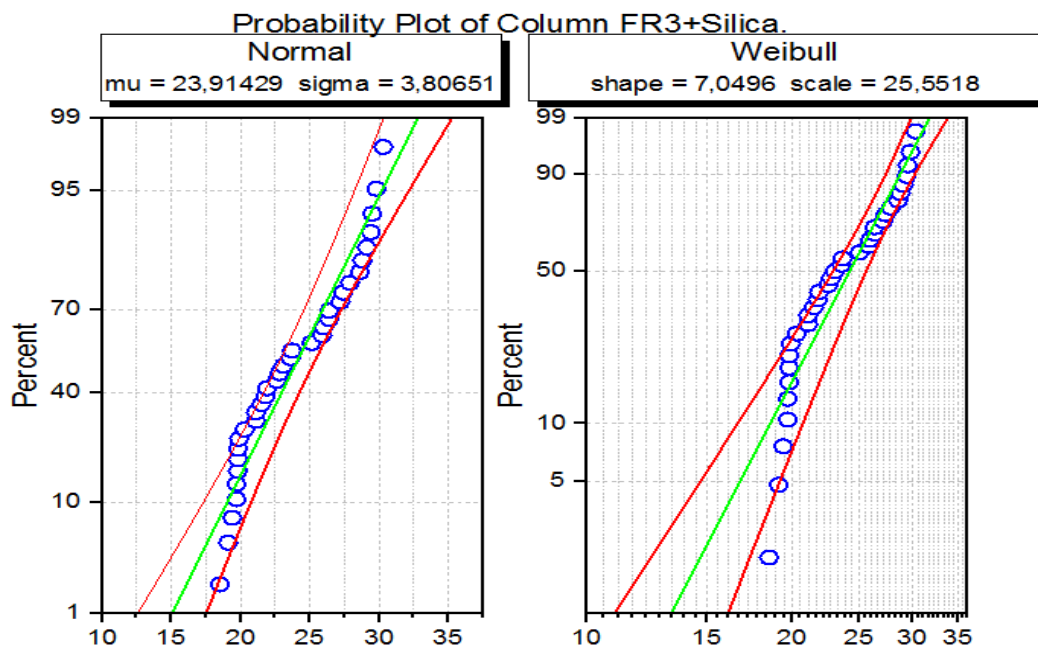
Τάση Διάσπασης	Weibull	Normal
V_{10}	19,71	20,55
V_{50}	26,88	26,55

Πίνακας 3.7

Περιεκτικότητα 0,008%



Σχήμα 3.15

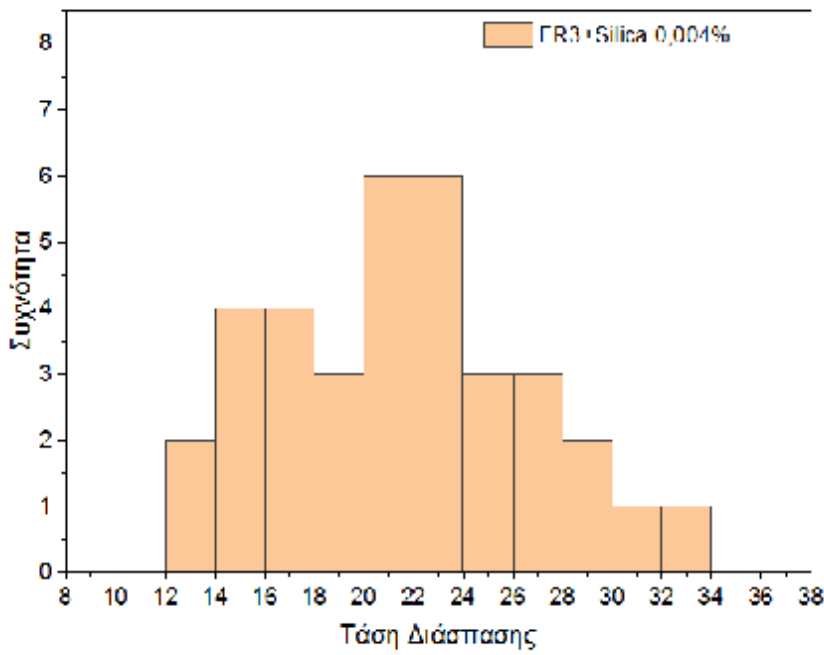


Σχήμα 3.16

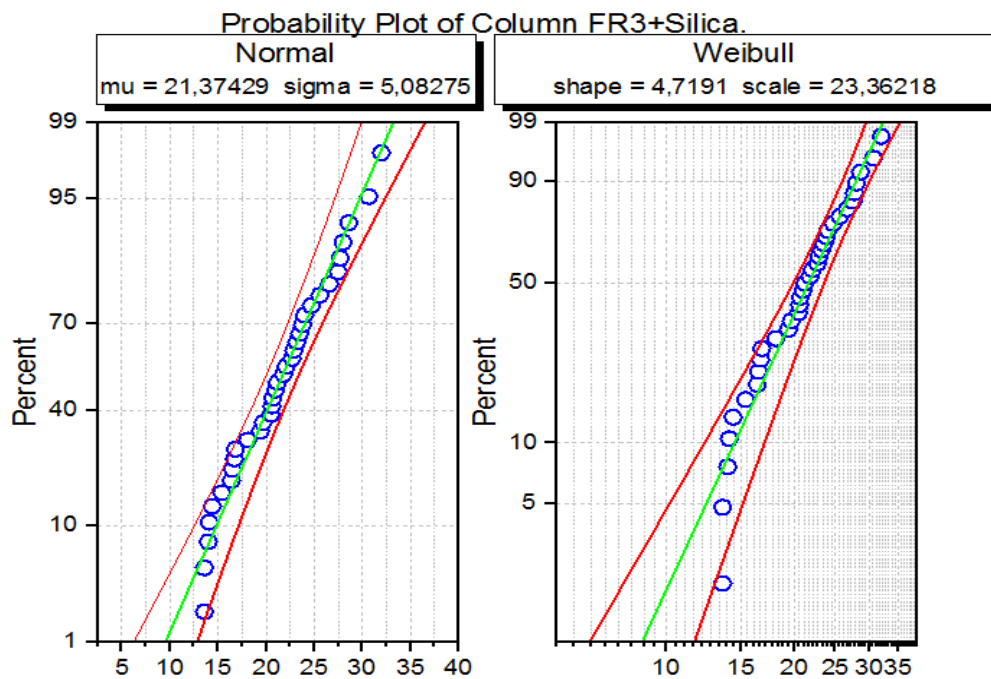
Τάση Διάσπασης	Weibull	Normal
V ₁₀	18,57	19,05
V ₅₀	24,26	23,92

Πίνακας 3.8

Περιεκτικότητα 0,004%



Σχήμα 3.17

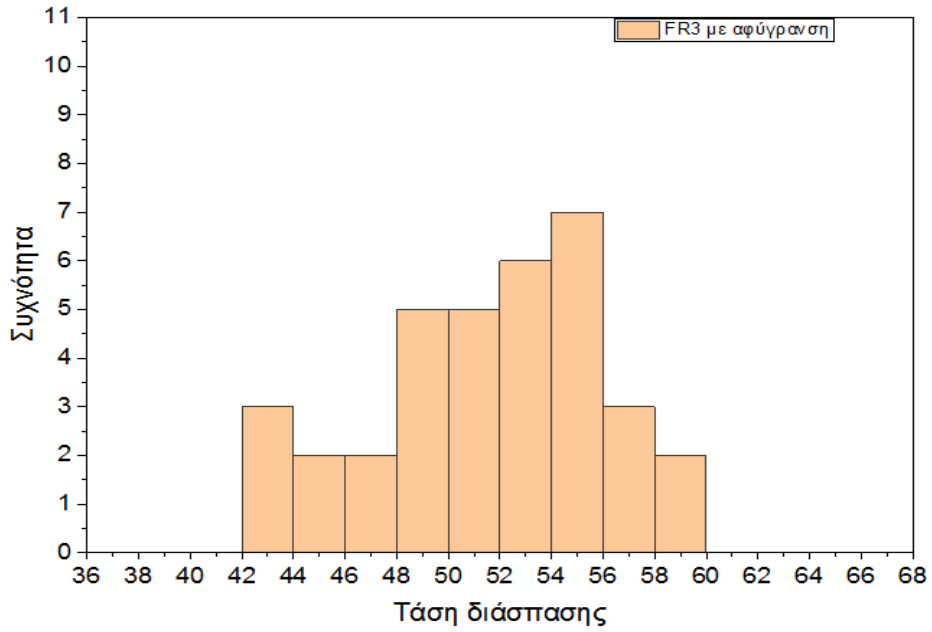


Σχήμα 3.18

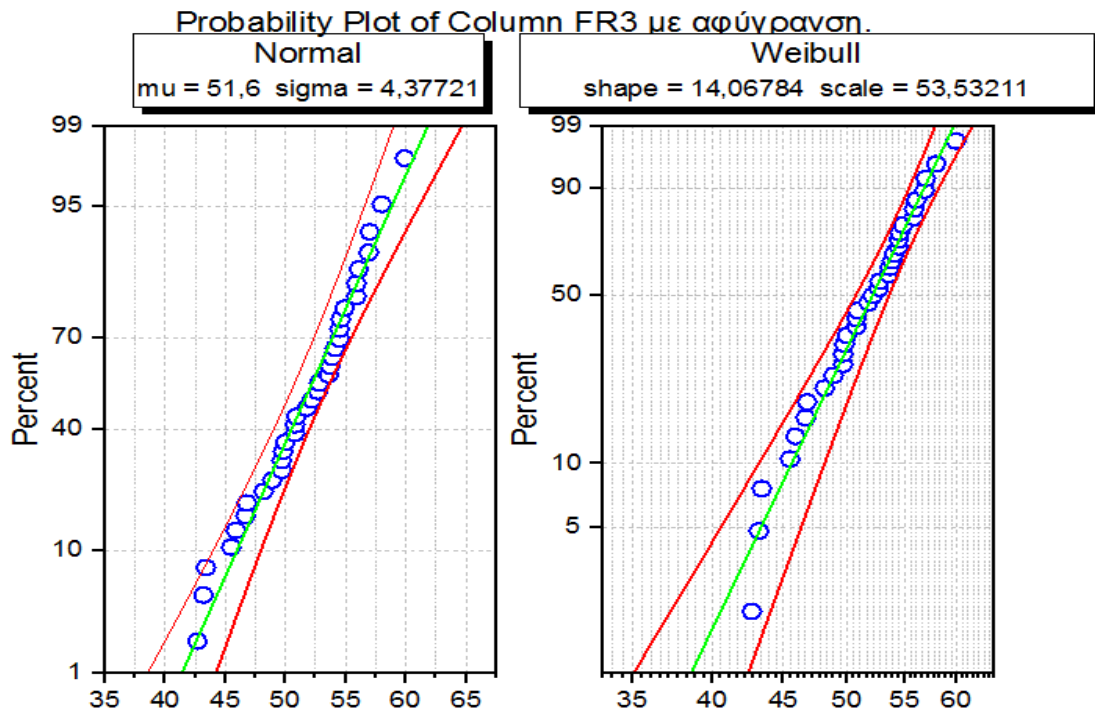
Τάση Διάσπασης	Weibull	Normal
V ₁₀	14,5	14,88
V ₅₀	21,62	21,38

Πίνακας 3.9

Base oil



Σχήμα 3.19



Σχήμα 3.20

Τάση Διάσπασης (KV)	Weibull	Normal
V ₁₀	45,65	46
V ₅₀	52,15	51,6

Πίνακας 3.10

3.7 Συμπεράσματα-Σχόλια-Παρατηρήσεις

Το βασικό συμπέρασμα από την διακύμανση της τάσης διάσπασης των νανοελαίων με silica είναι ότι παρατηρήθηκε μια συνεχής μείωση της μειούμενης της συγκέντρωσης τους στο FR3. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το συγκεκριμένο είδος νανοσωματιδίου σε αντίθεση με άλλα π.χ. οξείδια τιτανίου δεν ενδείκνυται για χρήση σε έλαιο μετασχηματιστή διότι απαιτείται μεγάλη συγκέντρωση για μεγάλη τάση διάσπασης η οποία όμως δημιουργεί των κίνδυνο της κακής διασκόρπισης συνεπώς της εμφάνισης ιζήματος και είναι και οικονομικά ασύμφορο. Ωστόσο παρατηρήθηκε και μικρή τυπική απόκλιση αρκετά μικρότερη σε σχέση με αυτή του σκέτου λαδιού το οποίο σημαίνει ότι τα αποτελέσματα που πήραμε μας δείχνουν την πραγματική μέση τάση διάσπασης. Ως μελλοντική επέκταση αυτής της διπλωματικής συνίσταται η προσθήκη των silica στο λάδι σε περιβάλλον αζώτου καθώς με αυτόν τον τρόπο δεν θα έρθουν σε επαφή με το οξυγόνο και δεν θα τραβήξουν υγρασία.

3.8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΕΙΑ

- [1] Παπαροϊδάμης Γεωργιος «Διηλεκτρικές δοκιμές σε μονωτικά βιοδιασπώμενα λάδια» Διπλωματική εργασία τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, εργαστήριο Υψηλών Τάσεων.
- [2] Μάζης Αναστάσιος « Μελέτη Διηλεκτρικής Αντοχής Μονωτικών Ελαίων » Διπλωματική Εργασία του φοιτητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών
- [3] J. Martinez-Vega, "Dielectric Materials For Electrical Engineers", Hoboken, NJ USA: WILEY, 2010
- [4] R. Liao, "A comparative study of physicochemical, dielectric and thermal properties of pressboard insulation impregnated with natural ester and mineral oil," Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 18, no. 5, pp. 1626 - 1637, 2011.
- [5] Ιάσοντας Σιούτης Διπλωματική Εργασία Του Φοιτητή του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών: ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΕ ΜΟΝΩΤΙΚΑ ΛΑΔΙΑ
- [6] Γ. Τ. Δέρβος, Γ. Δ. Παρασκευάς, Π. Δ. Σκαφίδας, Ν. Στεφάνου«Dielectric Spectroscopy And Gas Chromatography Methods Applied on High-Voltage Transformer Oils», Αθήνα2006.
- [7]Τσιακτσήρας Δ. Ιωάννης «ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΟΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΡΥΠΑΝΣΗΣ», Διπλωματική εργασία τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, τομέας συστημάτων μετάδοσης πληροφορίας και τεχνολογίας υλικών, Αθήνα 2011.
- [8]Κουγιούλη Αλεξάνδρα «Παραμετρική μελέτη διηλεκτρικής αντοχής μονωτικών ελαίων»Διπλωματική εργασία τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών ,εργαστήριο Υψηλών Τάσεων, Πάτρα 2012.
- [9] Δημακοπούλου ΠαναγιώταΔιπλωματική ΕργασίαΤης Φοιτήτριας του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών:«Διηλεκτρικές Δοκιμές Μονωτικών Ελαίων Φυτικής Προέλευσης»
- [10]Σαμοίλης Β.Γ «Μονωτικά λάδια (προέλευση – χρήση – χαρακτηριστικά – συντήρηση)» ,Αθήνα 1979
- [11] Alan Darwin Christophe Perrier, Philippe Folliot, “The use of natural ester fluids in transformers”, mat post 07.
- [12] Ελένη Αθανασάτου, John Luksich – “NATURAL ESTERS AS A DIELECTRIC COOLANT IN POWER TRANSFORMERS” , Cooper Power Systems, Γλυφάδα, Αθήνα, pages: 1-8.
- [13] E.Gockenbach, H. Borsi, “New insulating liquids for high voltage apparatus’, Schering Institut, Germany
- [14]Παναγιώτης Σπ. Σβάρνας E. Kuffel, W.S. Zaengl, J. Kuffel , «Υψηλές Τάσεις»
- [15] C. Patrick McShane, J. Luksich, K.J. Rapp, “ Experience in Retrofilling Older Transformers with Natural Ester Based Dielectric Coolant”,
- [16] «ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ ΜΟΝΩΤΙΚΩΝ ΕΛΑΙΩΝ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ ΜΕ ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΝΑΝΟΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ»

της φοιτήτριας του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Τεχνολογίας Υπολογιστών, της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Πατρών:
ΠΟΛΥΔΩΡΟΠΟΥΛΟΥ ΕΥΤΥΧΙΑΣ

[17] "Cell-type-specific, Aptamer-functionalized Agents for Targeted Disease Therapy", J. Zhou and J. J. Rossi, NATURE, 17 June 2014.

[18] "Design and self-assembly of siRNA-functionalized RNA nanoparticles for use in automated nanomedicine", Kirill A. Afonin, Wade W. Grabow, Faye M. Walker, Eckart Bindewald, Marina A. Dobrovolskaia, Bruce A. Shapiro and Luc Jaeger, NATURE, 1 December 2011.

[19] "Optimization of non-periodic plasmonic light-trapping layers for thin-film solar cells", Ragip A. Pala, John S.Q. Liu, Edward S. Barnard, Daulet Askarov, Erik C. Garnett, Shanhui Fan and Mark L. Brongersma, Nature Communications, 01 July 2013.

[20] "Light trapping in thin film organic solar cells", Zheng Tang, Wolfgang Tress, Olle Inganas, Materials Today, volume 17, issue 8, October 2014.

[21] "AC (60Hz) and impulse breakdown strength of a colloidal fluid based on transformer oil and magnetite nanoparticles", V. Segal, A. Hjortsberg, A. Rabinovich, D. Natras and K. Raj, IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, p. 619-622, June 1998.

[22] "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles", S.U.S. Choi and J.A. Eastman, International Mechanical Engineering Congress Exposition, p. 99-105, 1995.

[23] "Nanofluids: Science and Technology", Sarit K. Das, Stephen U. Choi, Wenhua Yu and T. Pradeep, Wiley, February 2008. 134

[24] "Dielectric breakdown strength of magnetic nanofluid based on insulation oil after impulse test", M. Nazaria, M.H. Rasoulifard, H. Hosseinic, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, volume 399, p.1-4, 1 February 2016.

[25] "Effects of nanoparticle charging on streamer development in transformer oil-based Nanofluids", J. G. Hwang, M. Zahn, F. M. Sullivan, A. A. Pettersson, O. Hjortstam and R. Liu, Journal of Applied Physics, volume 107, issue 1, p.1-17, 2010.

[26] "Dielectric properties of nanopowder dispersions in paraffin oil", J.A. Mergos, M.D. Athanasopoulou, T.G. Argyropoulos, C.T. Dervos, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, volume 19, issue 5, p.1502-1507, October 2012.

[27] "Properties of Mineral Oil based Silica Nanofluids", J. Huifei, T. Andritsch, I.A. Tsekmes, R. Kochetov, P.H.F. Morshuis, J.J. Smit, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, volume 21, issue 3, p.1100-1108, June 2014.

[28] "Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture", X. Wang, X. Xu and S.U.S. Choi, International Journal of Thermophysics, Heat Transfer, 1999, volume 13, p.474-480.

[29] "Enhancement of Thermal Conductivity with CuO for Nanofluids", M. Liu, M. Lin, I. Huang and C. Wang, Chemical Engineering and Technology, volume 29, p.72-77, 2006.

[30] "Convective Heat Transfer Characteristics of Nanofluids under Laminar and Turbulent Flow Conditions", D. Kim, Y. Kwon, Y. Cho, C. U, S. Cheong and Y. Hwang, Current Applied Physics, volume 9, p.119-123, 2009.

[31] "The effect of nanoparticle surfactant polarization on trapping depth of vegetable insulating oil-based nanofluids", J. Li, B. Du, F. Wang, W. Yao, S. Yao, Physics Letters A, volume 380, issue 4, p.604-608, 5 February 2016.

- [32] "High thermal conductivity transformer oil filled with BN nanoparticles", B.X. Du, X.L. Li, M. Xiao, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, volume 22, issue 2, p.851-858, April 2015. 135
- [33] "Thermal conductivity and dielectric characteristics of transformer oil filled with bn and Fe₃O₄ nanoparticles", B.X. Du, X.L. Li, J. Li, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, volume 22, issue 5, p.2530-2536, October 2015.
- [34] "Electrically Insulating Thermal Nano-Oils Using 2D Fillers", J. Taha-Tijerina, T.N. Narayanan, G. Gao, M. Rohde, D. A. Tsentalovich, M. Pasquali and P.M. Ajayan, ACS NANO, volume 6, p.1214-1220, 2012.
- [35] "Dispersion behaviour and breakdown strength of transformer oil filled with TiO₂ nanoparticles", E.G. Atiya, E.A. Mansour, R.M. Khattab, A.M. Azmy, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, volume 22, issue 5, p.2463-2472, October 2015.
- [36] "Insulating properties and charge characteristics of natural ester fluid modified by TiO₂ semiconductive nanoparticles", Y. Zhong, Y. Lv, C. Li, Y. Du, M. Chen, S. Zang, Y. Zhoy and L. Cheng, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, volume 20, p.135-140, 2013.
- [37] "Recent progress in nanofluids based on transformer oil:preparation and electrical insulation properties", Y.Z. Lv, Y.Zhou, C. R. Li, Q. Wang and B. Qi, IEEE Electrical Insulation Magazine, volume 30, p.23-32, 2014.
- [38] "Preparation of a vegetable oil-based nanofluid and investigation of its breakdown and dielectric properties", J. Li, Z. Zhang, P. Zou, S. Grzybowski and M. Zahn, IEEE Electrical Insulation Magazine, volume 28, issue 5, p.43-50, 2012.
- [39] "Enhanced Thermal Conductivity and Viscosity of Nanodiamond-nickel Nanocomposite Nanofluids", L. S. Sundar, M. K. Singh, E. V. Ramana, B. Singh, J. Gracio and A. C. M. Sousa, Scientific Reports, volume 4, p.4039, 2014.
- [40] "Effect of electron shallow trap on breakdown performance of transformer oil-based nanofluids", Y. F. Du, Y. Z. Lv, C. R. Li, M. T. Chen, J. Q. Zhou, X. X. Li, Y. Zhou and Y. X. Zhong, Journal of Applied Physics, volume 110, p.104, 2011.
- [41] "Experimental Investigation of the Dielectric and Cooling Performance of Colloidal Suspensions in Insulating Media", M. Chiesa and S. K. Das, Colloids and Surfaces A, volume 335, p.88-97, 2009. 136
- [42] "Thermal Conductivity and Lubrication Characteristics of Nanofluids", Y. Hwang, H. S. Park, J. K. Lee and W. H. Jung, Current Applied Physics, volume 6, p.67-71, 2006.
- [43] "Forced Convective Heat Transfer of Nanofluids in Microchannels", J. Y. Jung, H. S. Oh and H. Y. Kwak, International Journal of Heat and Mass Transfer, volume 52, p.466-472, 2009.
- [44] "A theory of interaction of particles in presence of electric double-layers and the stability of lyophobic colloids and disperse systems", B. Derjaguin, Acta Physico-Chimica Sinica, volume 10, p.333-346, 1939. 137
- [45] "Theory of the stability of lyophobic sols and of the adhesion of strongly charged particles in solutions of electrolytes", B. Derjaguin, and L. D. Landau, Acta Physico-Chimica Sinica, volume 14, p.633-662, 1941.
- [46] "Theory of the stability of Lyophobic Colloids", E. J. W. Verwey, and J. T. G. Overbeek, Elsevier Amsterdam, 1948.
- [47]"Colloidal Dispersions", W. B. Russel, D. A. Saville and W. R. Schowalter, Cambridge University Press, 1989.

- [48] "Particle Deposition and Aggregation: Measurement, Modeling, and Simulation", M. Elimelech, J. Gregory, X. Jia and R. A. Williams, Butterworth-Heinemann Ltd. Oxford, 1995.
- [49] "Intermolecular and Surface Forces", J. Israelachvili, 3d Academic Press, London, 2011.
- [50] "Dielectric Nanocomposites with Insulating Properties", T. Takala, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, volume 12, p.914-928, 2005.
- [51] "On Two Nanocomposite Models: Differences, Similarities and Interpretational Possibilities Regarding Tsagaropoulos Model and Takala's Model", M. G. Danikas, Journal of Electrical Engineering, volume 4, p.241-246, 2010.
- [52] "Nanocomposites – A Review of Electrical Treeing and Breakdown", M. G. Danikas, T. Takala, IEEE Electrical Insulation Magazine, volume 25, issue 4, 2009.
- [53] "Effects of nanoparticle charging on streamer development in transformer oil based Nanofluids", J. G. Hwang, M. Zahn, F. M. O'Sullivan, L. A. A. Pettersson, O. Hjortstam, R. Liu, Journal of Applied Physics, volume 107, 2010.
- [54] "Superior dielectric breakdown strength of grapheme and carbon nanotube infused nano-oils", P. Dhar, A. Katiyar, L.S. Maganti, A. Pattamatta and S.K. Das, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, volume 23, p.943-956, April 2016.
- [55] "Ferrodynamics", R.E. Rosensweig, Cambridge University Press, 1985. 138
- [56] "Colloidal stability of ultrasmall superparamagnetic iron oxide (USPIO) particles with different coatings", M. Di Marco, I. Guilbert, M. Port, C. Robic, P. Couvreur, C. Dubernet, International Journal of Pharmaceutics, volume 331, p.197-203, issue 2, 1 March 2007.
- [57] "Interfacial Phenomena and Colloid Stability: Basic Principles", T.F. Tadros, De Gruyter, 2015.
- [58] ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ ΥΓΡΩΝ ΝΑΝΟΔΙΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΓΙΑ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΕ ΥΨΗΛΕΣ ΤΑΣΕΙΣ. ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ ΓΕΩΡΓΙΟΥ Δ. ΠΕΠΠΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΥΧΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΟΥ ΜΗΧΑΝΙΚΟΥ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΑΤΡΩΝ ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

3.9 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ-ΠΙΝΑΚΕΣ

Σε όλες τις μετρήσεις χρησιμοποιήσαμε λάδι φυτικής προέλευσης Envirotemp® FR3™. Αρχικά ξεκινήσαμε με το πρότυπο IEC 60156 αλλά λόγω κακών αποτελεσμάτων χρησιμοποιήσαμε το πρότυπο ASTM D1816:2004. Ξεκινήσαμε τα σετ μετρήσεων με αφύγρανση και χωρίς και έπειτα προσθέσαμε νανοσωματίδια για να μελετήσουμε την λειτουργία του ελαίου και χωρίς αυτά. Έπειτα ξεκινήσαμε το 1^ο μέρος της έρευνας όπου είναι η μέτρηση της τάσης διάσπασης με νανοσωματίδια silica με αφύγρανση. Τέλος το δεύτερο μέρος ήταν η μέτρηση της τάσης διάσπασης με νανοσωματίδια χωρίς αφύγρανση.

Φυτικό μονωτικό έλαιο χωρίς αφύγρανση

Ημερομηνία διεξαγωγής : 11/07/2018

Πρότυπο : IEC 60156

Διάκενο: 2,5 mm

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Set 1	Set 2	Set 3	Set 4	Set 5	Set 6
62,0	51,0	69,0	86,2	97,9	92,6
67,1	71,7	77,5	96,6	100,5	101,0
62,4	89,2	77,5	92,7	95,0	104,2
90,2	76,3	54,8	96,3	104,2	104,3
101,0	53,7	70,3	84,1	101,8	101,3
100,9	66,1	78,7	104,4	101,1	101,2

Φυτικό μονωτικό έλαιο χωρίς αφύγρανση

Ημερομηνία διεξαγωγής : 11/07/2018

Πρότυπο : ASTM D1816:2004

Διάκενο: 1 mm

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

	Vb(KV) Set 1	Vb(KV) Set 2	Vb(KV) Set 3	Vb(KV) Set 4	Vb(KV) Set 5	Vb(KV) Set 6	Vb(KV) Set 7
	42,2	47,4	45,1	43,7	46,5	49,6	47,8
	40,7	44,9	48,1	45,2	51,5	50,5	47,7
	34,9	47,4	51,1	39,6	44,0	35,0	49,6
	40,8	46,6	48,3	48,0	46,2	50,1	52,3
	45,0	43,3	50,7	50,5	49,1	53,7	46,2
Mean value(KV)	40,7	45,9	48,7	45,4	47,5	47,8	48,7
Stand. Dev.(KV)	3,7	1,8	2,4	4,2	2,9	7,3	2,4
Stand.dev.\ mean .value.(%)	9,0	3,9	5,0	9,2	6,1	15,3	4,8

Φυτικό μονωτικό έλαιο με αφύγρανση

Ημερομηνία διεξαγωγής : 11/07/2018

Πρότυπο : ASTM D1816:2004

Διάκενο: 1 mm

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

	Vb(KV) Set 1	Vb(KV) Set 2	Vb(KV) Set 3	Vb(KV) Set 4	Vb(KV) Set 5	Vb(KV) Set 6	Vb(KV) Set 7
	49,7	45,5	54,6	59,9	53,6	52,7	50,8
	45,9	55,9	53,7	43,2	58,0	52,2	48,9
	50,8	50,9	54,1	42,7	43,4	48,2	49,8
	52,8	54,9	53,9	46,8	49,7	46,7	56,1
	55,9	54,5	51,8	57,0	54,5	50,0	56,9
Mean value(KV)	51,0	52,3	53,6	49,9	51,8	50,0	52,5
Stand. Dev.(KV)	3,7	4,2	1,1	8,0	5,6	2,5	3,7
Stand.dev.\ mean .value.(%)	7,2	8,1	2,1	16,1	10,7	5,1	7,1

1ο μέρος

Φυτικό μονωτικό έλαιο με αφύγρανση με νανοσωματίδια silica (160mg)

Ημερομηνία διεξαγωγής : 12/07/2018

Πρότυπο : ASTM D1816:2004

Διάκενο: 1 mm

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Ποσότητα ελαίου : 400 ml

Περιεκτικότητα: 0,032(%)

	Vb(KV) Set 1	Vb(KV) Set 2	Vb(KV) Set 3	Vb(KV) Set 4	Vb(KV) Set 5	Vb(KV) Set 6	Vb(KV) Set 7
	44,4	39,2	33,8	41,3	39,2	42,9	46,3
	40,7	22,5	28,5	39,5	44,3	46,8	43,5
	34,6	24,7	25,9	43,3	39,3	44,2	41,7
	45,5	23,1	38,7	39,1	42,7	42,6	35,9
	37,5	28,5	37,5	34,9	39,0	45,1	36,9
Mean value(KV)	40,5	27,6	32,9	39,6	40,9	44,3	40,8
Stand. Dev.(KV)	4,6	6,9	5,6	3,1	2,4	1,7	4,4
Stand.dev.\ mean .value.(%)	11,4	24,9	16,9	7,8	5,9	3,9	10,7

Φυτικό μονωτικό έλαιο με αφύγρανση με νανοσωματίδια silica (160mg)

Ημερομηνία διεξαγωγής : 12/07/2018

Πρότυπο : ASTM D1816:2004

Διάκενο: 1 mm

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Ποσότητα ελαίου : 457ml

Περιεκτικότητα: 0,028%

	Vb(KV) Set 1	Vb(KV) Set 2	Vb(KV) Set 3	Vb(KV) Set 4	Vb(KV) Set 5	Vb(KV) Set 6	Vb(KV) Set 7
	13,7	37,6	36,3	42,0	43,1	39,9	39,7
	12,4	39,2	37,0	33,2	38,2	38,3	30,4
	28,9	36,9	36,9	31,7	36,8	31,5	44,1
	29,7	36,9	33,3	39,5	40,4	34,6	37,8
	33,2	35,6	37,5	33,9	42,0	43,0	34,2
Mean value(KV)	23,6	37,2	36,2	36,0	40,1	37,5	37,2
Stand. Dev.(KV)	9,8	1,3	1,7	4,5	2,6	4,5	5,2
Stand.dev.\ mean .value.(%)	41,4	3,5	4,6	12,3	6,5	12,0	14,1

Φυτικό μονωτικό έλαιο με αφύγρανση με νανοσωματίδια silica (160mg)

Ημερομηνία διεξαγωγής : 12/07/2018

Πρότυπο : ASTM D1816:2004

Διάκενο: 1 mm

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Ποσότητα ελαίου : 466 ml

Περιεκτικότητα: 0,024%

	Vb(KV) Set 1	Vb(KV) Set 2	Vb(KV) Set 3	Vb(KV) Set 4	Vb(KV) Set 5	Vb(KV) Set 6	Vb(KV) Set 7
	15,1	24,0	28,4	35,9	32,2	37,7	39,7
	20,9	25,2	24,6	32,1	41,3	27,7	30,9
	19,8	26,6	28,0	39,6	27,6	31,9	37,2
	13,7	26,2	33,1	28,4	29,8	35,9	35,0
	21,3	22,6	29,1	37,3	35,2	35,4	38,0
Mean value(KV)	18,2	24,9	28,6	34,7	33,2	33,7	36,2
Stand. Dev.(KV)	3,5	1,6	3,0	4,4	5,3	4,0	3,4
Stand.dev.\ mean .value.(%)	19,3	6,6	10,6	12,8	16,1	11,8	9,4

Φυτικό μονωτικό έλαιο με αφύγρανση με νανοσωματίδια silica (160mg)

Ημερομηνία διεξαγωγής : 18/07/2018

Πρότυπο : ASTM D1816:2004

Διάκενο: 1 mm

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Ποσότητα ελαίου : 480ml

Περιεκτικότητα: 0,020%

	Vb(KV) Set 1	Vb(KV) Set 2	Vb(KV) Set 3	Vb(KV) Set 4	Vb(KV) Set 5	Vb(KV) Set 6	Vb(KV) Set 7
	26,7	10,8	25,2	24,4	24,7	29,4	26,7
	17,2	15,0	20,5	25,6	20,3	23,6	23,7
	14,8	22,5	25,0	26,3	27,8	19,9	25,1
	4,5	19,6	26,3	24,5	27,2	20,2	23,6
	6,5	17,3	29,7	27,9	33,9	20,5	27,4
Mean value(KV)	13,9	17,1	25,4	25,7	26,8	22,7	25,3
Stand. Dev.(KV)	8,9	4,5	3,3	1,4	5,0	4,0	1,7
Stand.dev.\ mean .value.(%)	63,9	26,2	13,0	5,6	18,5	17,7	6,8

Φυτικό μονωτικό έλαιο με αφύγρανση με νανοσωματίδια silica (160mg)

Ημερομηνία διεξαγωγής : 18/07/2018

Πρότυπο : ASTM D1816:2004

Διάκενο: 1 mm

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Ποσότητα ελαίου : 500ml

Περιεκτικότητα: 0,016%

	Vb(KV) Set 1	Vb(KV) Set 2	Vb(KV) Set 3	Vb(KV) Set 4	Vb(KV) Set 5	Vb(KV) Set 6	Vb(KV) Set 7
	17,9	19,5	20,0	25,1	26,6	24,2	25,7
	15,0	25,5	22,8	26,0	27,6	25,2	20,1
	15,8	25,5	24,5	22,2	25,0	21,2	18,3
	19,0	24,2	30,0	23,2	27,3	27,1	23,0
	20,2	26,5	28,7	20,2	23,2	25,2	25,8
Mean value(KV)	17,6	24,2	25,2	23,4	26,0	24,6	22,6
Stand. Dev.(KV)	2,2	2,8	4,1	2,3	1,8	2,1	3,4
Stand.dev.\ mean .value.(%)	12,3	11,4	16,3	9,8	7,1	8,7	14,9

Φυτικό μονωτικό έλαιο με αφύγρανση με νανοσωματίδια silica (160mg)

Ημερομηνία διεξαγωγής : 18/07/2018

Πρότυπο : ASTM D1816:2004

Διάκενο: 1 mm

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Ποσότητα ελαίου : 533ml

Περιεκτικότητα: 0,012%

	Vb(KV) Set 1	Vb(KV) Set 2	Vb(KV) Set 3	Vb(KV) Set 4	Vb(KV) Set 5	Vb(KV) Set 6	Vb(KV) Set 7
	36,4	28,0	33,1	25,5	21,0	33,1	28,3
	21,8	23,5	25,1	21,3	20,1	31,5	22,4
	35,7	22,7	24,3	26,4	25,9	31,3	30,5
	21,7	22,6	20,7	28,2	29,5	30,3	34,1
	24,4	27,6	22,5	22,8	20,3	29,7	26,7
Mean value(KV)	28,0	24,9	25,2	24,8	23,4	31,2	28,4
Stand. Dev.(KV)	7,5	2,7	4,8	2,8	4,2	1,3	4,4
Stand.dev.\ mean .value.(%)	26,6	10,8	18,9	11,1	17,9	4,1	15,3

Φυτικό μονωτικό έλαιο με αφύγρανση με νανοσωματίδια silica (160mg)

Ημερομηνία διεξαγωγής : 19/07/2018

Πρότυπο : ASTM D1816:2004

Διάκενο: 1 mm

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Ποσότητα ελαίου : 600ml

Περιεκτικότητα:0,008%

	Vb(KV) Set 1	Vb(KV) Set 2	Vb(KV) Set 3	Vb(KV) Set 4	Vb(KV) Set 5	Vb(KV) Set 6	Vb(KV) Set 7
	19,1	27,2	20,3	22,6	29,5	19,7	26,4
	19,8	21,8	21,9	18,5	29,4	26,4	19,7
	22,8	26,0	19,8	29,8	19,8	19,4	30,3
	21,5	25,1	19,9	28,8	23,6	25,9	28,6
	23,1	27,4	21,1	21,1	23,7	27,9	29,1
Mean value(KV)	21,2	25,5	20,6	24,2	25,2	23,8	26,8
Stand. Dev.(KV)	1,8	2,3	0,9	4,9	4,2	4,0	4,2
Stand.dev.\ mean .value.(%)	8,4	8,9	4,3	20,5	16,7	16,9	15,8

Φυτικό μονωτικό έλαιο με αφύγρανση με νανοσωματίδια silica (160mg)

Ημερομηνία διεξαγωγής : 19/07/2018

Πρότυπο : ASTM D1816:2004

Διάκενο: 1 mm

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Ποσότητα ελαίου : 800ml

Περιεκτικότητα:0,004%

	Vb(KV) Set 1	Vb(KV) Set 2	Vb(KV) Set 3	Vb(KV) Set 4	Vb(KV) Set 5	Vb(KV) Set 6	Vb(KV) Set 7
	13,6	14,4	16,7	22,9	23,5	24,7	27,7
	15,4	16,4	14,0	21,8	22,7	26,6	27,5
	21,0	20,7	14,1	20,5	23,2	25,6	28,0
	16,8	19,7	13,6	23,8	20,6	28,6	30,7
	18,1	16,5	19,4	21,2	22,1	24,0	32,0
Mean value(KV)	17,0	17,5	15,6	22,1	22,4	25,9	29,2
Stand. Dev.(KV)	2,8	2,6	2,5	1,3	1,1	1,8	2,0
Stand.dev.\ mean .value.(%)	16,5	14,8	15,9	5,9	5,1	6,9	7,0

2ο μέρος

Φυτικό μονωτικό έλαιο χωρίς αφύγρανση με νανοσωματίδια silica (160mg)

Ημερομηνία διεξαγωγής : 19/09/2018

Πρότυπο : ASTM D1816:2004

Διάκενο: 1 mm

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Ποσότητα ελαίου : 400ml

Περιεκτικότητα:0,032%

	Vb(KV) Set 1	Vb(KV) Set 2	Vb(KV) Set 3	Vb(KV) Set 4	Vb(KV) Set 5	Vb(KV) Set 6	Vb(KV) Set 7
	15,8	6,9	7,0	7,1	4,9	7,1	6,7
	5,7	5,7	6,8	6,7	6,1	6,1	6,2
	7,9	7,1	6,9	5,9	7,5	7,3	6,4
	7,3	6,8	7,5	7,9	6,6	7,7	7,3
	5,6	6,9	7,3	6,4	5,7	5,7	6,6
Mean value(KV)	8,5	6,7	7,1	6,8	6,2	6,8	6,6
Stand. Dev.(KV)	4,2	0,6	0,3	0,8	1,0	0,8	0,4
Stand.dev.\ mean .value.(%)	49,8	8,6	4,3	11,2	15,7	12,3	6,6

Φυτικό μονωτικό έλαιο χωρίς αφύγρανση με νανοσωματίδια silica (80mg)

Ημερομηνία διεξαγωγής : 19/09/2018

Πρότυπο : ASTM D1816:2004

Διάκενο: 1 mm

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Ποσότητα ελαίου : 400ml

Περιεκτικότητα:0,016%

	Vb(KV) Set 1	Vb(KV) Set 2	Vb(KV) Set 3	Vb(KV) Set 4	Vb(KV) Set 5	Vb(KV) Set 6	Vb(KV) Set 7
	20,6	29,5	25,1	30,2	32,2	35,1	36,3
	27,3	30,8	27,4	34,3	30,7	23,9	27,1
	23,2	29,2	21,9	30,5	32,6	35,7	35,2
	19,5	23,7	24,3	34,3	23,4	24,6	24,4
	28,1	21,8	28,8	35,0	33,9	37,4	38,7
Mean value(KV)	23,7	27,0	25,5	32,9	30,5	31,3	32,4
Stand. Dev.(KV)	3,9	4,0	2,7	2,3	4,2	6,5	6,2
Stand.dev.\ mean .value.(%)	16,3	14,8	10,5	7,0	13,7	20,7	19,2

Φυτικό μονωτικό έλαιο χωρίς αφύγρανση με νανοσωματίδια silica (80mg)

Ημερομηνία διεξαγωγής : 27/09/2018

Πρότυπο : ASTM D1816:2004

Διάκενο: 1 mm

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Ποσότητα ελαίου : 400ml

Περιεκτικότητα:0,016%

	Vb(KV) Set 1	Vb(KV) Set 2	Vb(KV) Set 3	Vb(KV) Set 4	Vb(KV) Set 5	Vb(KV) Set 6	Vb(KV) Set 7
	10,5	11,0	14,0	18,0	18,7	21,6	25,8
	13,8	3,7	12,8	19,3	20,1	22,1	25,9
	12,6	7,9	17,1	17,3	17,9	24,6	25,3
	11,4	13,1	22,7	21,1	18,3	25,1	24,1
	11,4	12,8	29,5	20,5	21,3	19,1	27,8
Mean value(KV)	12,0	9,7	19,2	19,2	19,3	22,5	25,8
Stand. Dev.(KV)	1,3	4,0	6,9	1,6	1,4	2,4	1,3
Stand.dev.\ mean .value.(%)	10,7	40,9	36,0	8,3	7,3	10,9	5,2

Φυτικό μονωτικό έλαιο χωρίς αφύγρανση με νανοσωματίδια silica(80mg)

Ημερομηνία διεξαγωγής : 27/09/2018

Πρότυπο : ASTM D1816:2004

Διάκενο: 1 mm

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Ποσότητα ελαίου : 533ml

Περιεκτικότητα:0,012%

	Vb(KV) Set 1	Vb(KV) Set 2	Vb(KV) Set 3	Vb(KV) Set 4	Vb(KV) Set 5	Vb(KV) Set 6	Vb(KV) Set 7
	21,5	22,2	28,8	11,5	15,9	18,2	21,3
	23,8	24,5	30,5	15,8	17,6	20,3	19,0
	21,2	26,3	30,0	14,2	23,6	18,9	20,5
	23,2	25,6	27,0	18,3	19,1	19,8	24,0
	22,8	23,9	34,3	19,6	19,6	18,3	26,0
Mean value(KV)	22,5	24,5	30,1	15,9	19,2	19,1	22,2
Stand. Dev.(KV)	1,1	1,6	2,7	3,2	2,9	0,9	2,8
Stand.dev.\ mean .value.(%)	4,9	6,5	9,0	20,4	15,1	4,9	12,6

Φυτικό μονωτικό έλαιο χωρίς αφύγρανση με νανοσωματίδια silica(80mg)

Ημερομηνία διεξαγωγής : 27/09/2018

Πρότυπο : ASTM D1816:2004

Διάκενο: 1 mm

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Ποσότητα ελαίου : 600ml

Περιεκτικότητα:0,008%

	Vb(KV) Set 1	Vb(KV) Set 2	Vb(KV) Set 3	Vb(KV) Set 4	Vb(KV) Set 5	Vb(KV) Set 6	Vb(KV) Set 7
	31,1	32,1	26,1	29,7	13,5	33,8	32,9
	29,8	31,7	24,9	28,0	25,1	32,6	31,6
	29,8	20,2	25,5	30,1	25,6	29,6	32,3
	29,4	22,0	29,0	28,5	31,6	30,3	32,5
	32,4	24,7	26,6	32,2	30,9	30,5	31,5
Mean value(KV)	30,5	26,1	26,4	29,7	25,3	31,4	32,1
Stand. Dev.(KV)	1,2	5,5	1,6	1,6	7,2	1,8	0,6
Stand.dev.\ mean .value.(%)	4,1	21,1	6,0	5,5	28,5	5,6	1,8

Φυτικό μονωτικό έλαιο χωρίς αφύγρανση με νανοσωματίδια silica(80mg)

Ημερομηνία διεξαγωγής : 28/09/2018

Πρότυπο : ASTM D1816:2004

Διάκενο: 1 mm

Ηλεκτρόδια : Rogowsky – Rogowsky

Ποσότητα ελαίου : 800ml

Περιεκτικότητα:0,004%

	Vb(KV) Set 1	Vb(KV) Set 2	Vb(KV) Set 3	Vb(KV) Set 4	Vb(KV) Set 5	Vb(KV) Set 6	Vb(KV) Set 7
	16,2	16,5	22,2	19,5	16,9	21,1	15,9
	13,8	21,3	21,5	20,7	13,7	22,8	15,6
	15,8	22,0	21,0	19,2	22,1	22,3	16,1
	17,1	20,2	21,4	21,2	22,2	22,2	19,6
	17,3	21,8	18,9	15,5	21,1	25,9	18,3
Mean value(KV)	16,0	20,4	21,0	19,2	19,2	22,8	17,8
Stand. Dev.(KV)	1,4	2,3	1,3	2,2	3,7	1,8	1,8
Stand.dev.\ mean .value.(%)	8,8	11,1	6,1	11,7	19,5	8,0	10,3