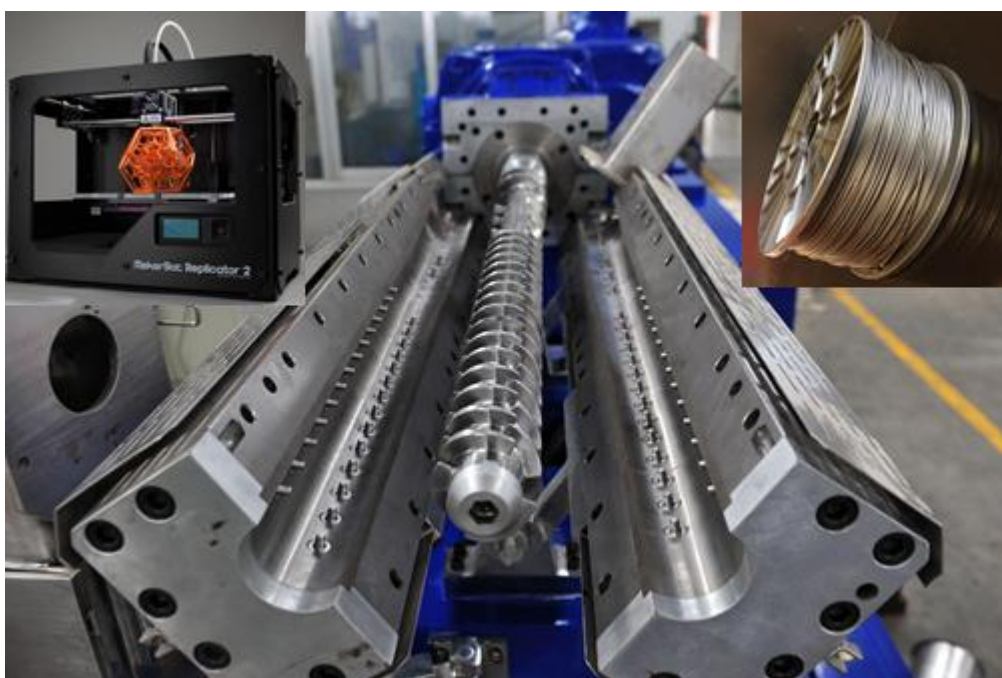


ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΕΛΛΑΔΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ Τ.Ε.

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΞΩΘΗΤΗ ΜΙΚΡΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΩΣ ΠΡΩΤΗ ΥΛΗ 3D PRINTING ΚΑΙ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ



ΣΠΟΥΔΑΣΤΗΣ: ΚΥΡΙΑΚΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΣΙΝΟΠΟΥΛΟΣ ΣΤΕΦΑΝΟΣ, ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΠΑΤΡΑ 2015

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία αφορά το σχεδιασμό και την ανάπτυξη ενός εξωθητή θερμοπλαστικών πολυμερών μικρών διαστάσεων για τη παραγωγή νήματος για 3D εκτυπωτές και συνθέτων υλικών.

Στην εισαγωγή της εργασίας αναφέρονται βασικά θέματα για τα πολυμερή, τους εξωθητές και τα σύνθετα υλικά θερμοπλαστικής μήτρας. Πρόκειται για αναφορές σε θέματα που απασχολούν την πτυχιακή εργασία και θα αναλυθούν ή μελετηθούν στην πορεία της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο του κυρίως κειμένου αναλύονται άκρως σημαντικά θέματα χημείας και τεχνολογίας θερμοπλαστικών που έχουν ως στόχο την κατανόηση της φύσης των θερμοπλαστικών, τις αρχές επεξεργασίας τους και την ένταξή τους στη βιομηχανία.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση των εξωθητών βιομηχανικού επιπέδου. Σκοπός του κεφαλαίου είναι η πλήρης κατανόηση της λειτουργίας και της τεχνολογίας των εξωθητών καθώς αναφέρονται όλες οι παράμετροι για την επιτυχή λειτουργία τους και οι εφαρμογές τους στη βιομηχανία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο λαμβάνει χώρα ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη του μικρού εξωθητή. Εδώ γίνεται καταγραφή των διαδικασιών που ακολούθησαν για το σκοπό αυτό καθώς τα υποκεφάλαια είναι κατανεμημένα με χρονική σειρά. Στο σχεδιασμό εντάσσεται και η σχεδίαση του εξωθητή μέσω του σχεδιαστικού λογισμικού Solidworks. Η σχεδίαση βοήθησε σε μεγάλο βαθμό στην ανάπτυξη της συσκευής καθώς αποφεύχθηκαν μελλοντικά μηχανικά προβλήματα κατά τη δημιουργία της.

Το πέμπτο κεφάλαιο που τοποθετείται μετά την επιτυχή κατασκευή του εξωθητή αφορά τη χρήση του για την εξώθηση καθαρών και ενισχυμένων θερμοπλαστικών με νανοσωλήνες άνθρακα. Σκοπός είναι η βελτιστοποίηση (optimization) της συσκευής βάσει της θερμοκρασίας εξώθησης και η πειραματική μελέτη της συμπεριφοράς των υλικών κατ' αυτή τη διαδικασία.

Στο έκτο κεφάλαιο δίδεται αναφορά για τη δοκιμή χρήσης του νήματος που παρήχθη από τον εξωθητή σε έναν εργαστηριακό 3D εκτυπωτή και καταγράφονται παρατηρήσεις.

Στο έβδομο κεφάλαιο καταγράφονται τα συμπεράσματα που βγήκαν από τη μελέτη των διαδικασιών και αναφέρονται εναλλακτικές ενέργειες για την εξέλιξη παρόμοιων εξωθητών.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε για το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. του Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Δυτικής Ελλάδος, στο εργαστήριο Τεχνικής Μηχανικής και ταλαντώσεων του Τμήματος Μηχανολόγων Αεροναυπηγών του Πανεπιστημίου Πατρών και στην ΑΔΑΜΑΝΤ ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΠΕ όπου πραγματοποίησα την πρακτική μου άσκηση. Πραγματεύεται το σχεδιασμό και την ανάπτυξη εξωθητή θερμοπλαστικών και τα νανοσύνθετα υλικά σωλήνων άνθρακα θερμοπλαστικής μήτρας.

Ασφαλώς το θέμα είναι μεγάλο και δεν καλύπτεται πλήρως μέσα στις επόμενες σελίδες, όμως πιστεύουμε ότι είναι ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα για την προσπάθειά μου για την εκπόνηση της πτυχιακής εργασίας μέσα στο έτος 2014-2015. Σημαντικό ρόλο για την πραγματοποίηση της εργασίας έπαιξαν οι γνώσεις που αποκόμισα από το Α.Τ.Ε.Ι. Δυτικής Ελλάδας και την πρακτική μου άσκηση στην εταιρία ΑΔΑΜΑΝΤ ΑΕΡΟΔΙΑΣΤΗΜΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΕΠΕ.

Για την επιτυχή ολοκλήρωση της εργασίας μεγάλο ρόλο είχε η βοήθεια που είχα από τον Δρ.Αντώνη Βαβουλιώτη, διευθύνων σύμβουλο της ΑΔΑΜΑΝΤ και τον Δρ.Μπαλτόπουλο Αθανάσιο, επιστημονικό συνεργάτη του εργαστηρίου Μηχανικής και ταλαντώσεων τους οποίους ευχαριστώ θερμά για τη στήριξη τους. Ένα μεγάλο ευχαριστώ επίσης στον Δρ.Βασίλειο Κωστόπουλο, διευθυντή του εργαστηρίου τεχνικής μηχανικής και ταλαντώσεων του Πανεπιστημίου Πατρών που στήριξε την υλοποίηση της εργασίας μου παρέχοντας κάθε είδους βοήθεια. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω των Δρ.Στέφανο Τσινόπουλο, Επίκουρο καθηγητή του τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών Τ.Ε. Χωρίς τους προαναφερθέντες δεν θα είχα ακολουθήσει την πορεία που ακολούθησα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	III
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	V
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	VII
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1 ΓΕΝΙΚΑ	1
1.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ.....	1
1.2.1 Γενικά	1
1.2.2 Θερμοπλαστικά	2
1.2.3 Θερμοσκληρυνόμενα	Σφάλμα! Δεν έχει οριστεί σελιδοδείκτης.
1.2.4 Ελαστομερή	3
1.3 ΕΞΩΘΕΤΣ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ.....	3
1.3.1 Ορισμός, αρχή λειτουργίας και εφαρμογές.....	3
1.3.2 Τύποι εξωθητών	3
1.4 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ	4
1.4.1 Ορισμός σύνθετου υλικού	4
1.4.2 Ενίσχυση θερμοπλαστικών	4
1.4.3 Νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs).....	5
1.4.4 Εφαρμογές σύνθετων θερμοπλαστικής μήτρας	6
1.5 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ.....	7
1.5.1 Εισαγωγή	7
1.5.2 Σύνθετα υλικά στη τρισδιάστατη εκτύπωση	7
2 ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ	9
2.1 ΧΗΜΕΙΑ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ	9
2.1.1 Πολυμερισμός	9
2.1.2 Ισομέρεια.....	9
2.1.3 Κρυσταλλικότητα.....	10
2.1.4 Σημαντικές θερμοκρασίες μεταβολής	11
2.1.5 Μοριακό βάρος	11
2.1.6 Ειδικός όγκος	11
2.1.7 Διαμοριακές δυνάμεις	12
2.1.8 Παράγοντες επηρεασμού μηχανικών ιδιοτήτων θερμοπλαστικών	13
2.1.9 Σημαντικά θερμοπλαστικά.....	16
2.2 ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΘΕΜΑΤΑ ΡΕΟΛΟΓΙΑΣ	21
2.2.1 Ιξώδες	21
2.2.2 Διατμητικές τάσεις και ρυθμός διάτμησης.....	22
2.2.3 Ρεολογική συμπεριφορά.....	24
2.2.4 Βισκοελαστικότητα.....	25

2.2.5	Θερμοκρασίες επεξεργασίας θερμοπλαστικών	25
3	ΕΞΩΘΗΤΗΣ ΜΕ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΚΟΧΛΙΑ	27
3.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ	27
3.2	ΖΩΝΕΣ ΕΞΩΘΗΣΗΣ	27
3.3	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΞΩΘΗΣΗΣ	28
3.4	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΞΩΘΗΣΗΣ	32
4	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΞΩΘΗΤΗ ΜΙΚΡΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ	39
4.1	ΈΡΕΥΝΑ ΣΧΕΔΙΩΝ ΕΞΩΘΗΤΩΝ, ΑΞΙΟΛΟΓΙΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΧΕΔΙΟΥ	39
4.2	ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΧΕΔΙΟΥ LYMAN FILAMENT EXTRUDER V3	46
4.3	ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΑ ΑΓΟΡΑΣ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ	50
4.4	ΚΙΝΗΣΗ ΒΗΜΑΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ARDUINO	59
4.5	ΠΡΩΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΠΡΟΤΥΠΗΣ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ	61
4.6	ΜΟΝΩΣΗ ΘΑΛΑΜΟΥ ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ	64
4.7	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ (ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟ ΠΡΟΦΙΛ ΘΑΛΑΜΟΥ ΕΞΩΘΗΣΗΣ)	68
4.8	ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΥΨΗΛΗΣ ΡΟΠΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ	69
4.9	ΠΡΩΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΠΛΑΣΤΙΚΟΥ	72
4.10	ΤΕΛΙΚΗ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΟ ΕΞΩΘΗΤΗ	74
5	ΕΞΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΘΕΡΜΟ-ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΜΕ CNTS ,	
	ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ	77
5.1	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΑ.....	77
5.2	ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ.....	78
6	ΧΡΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΜΕΝΟΥ ΝΗΜΑΤΟΣ ΣΕ 3D ΕΚΤΥΠΩΤΗ	83
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ	85
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	87
	ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΕΣ	88

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ο άνθρακας είναι το τέταρτο πιο άφθονο χημικό στοιχείο κατά μάζα στο σύμπαν, μετά από το υδρογόνο, το ήλιο και το οξυγόνο. Μας έχει χρησιμεύσει πολύ στην τεχνολογία καθώς οι χημικές ενώσεις του χρησιμοποιούνται σε τεχνολογίες όπως στην παραγωγή ελαστικών οχημάτων, καυσίμων, δοχείων τροφίμων, προηγμένων υλικών για την αεροναυπηγική και την αεροδιαστημική κ.α.

Αυτό όμως έχει μια εξήγηση που επεκτείνεται σε τρεις παράγοντες. Ο άνθρακας έχοντας τέσσερα ηλεκτρόνια στην εξωτερική του στοιβάδα μπορεί να δημιουργήσει ταυτόχρονα τέσσερις δεσμούς με άλλα άτομα, συμπεριλαμβανομένων κι άλλων ατόμων άνθρακα όπου αυτά μπορούν να συνδεθούν με άλλα τρία και ου το καθεξής. Συν αυτού, ο δεσμός άνθρακα-άνθρακα είναι ένας ισχυρός ομοιοπολικός δεσμός πράγμα που κάνει τις οργανικές ενώσεις ισχυρές και ανθεκτικές. Ο τελευταίος παράγοντας είναι η γεωμετρία του ατόμου του άνθρακα που θυμίζει τριγωνική πυραμίδα με κάθε μία ακμή του να παριστάνει τη θέση ενός ηλεκτρονίου και κάθε έδρα της πυραμίδας ένα ισόπλευρο τρίγωνο. Αυτή η συμμετρία που παρουσιάζει ο άνθρακας δίνει τις ίδιες πιθανότητες δημιουργίας δεσμού σε κάθε ηλεκτρόνιο.

Το επόμενο στοιχείο ικανό για τη δημιουργία τεσσάρων δεσμών είναι το πυρίτιο(Si) που είναι όμως ένα γενικά αδρανές στοιχείο και δεν είναι εύκολο να δημιουργήσει δεσμό με άλλο όμοιο άτομο όπως κάνει ο άνθρακας.

1.2 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΠΟΛΥΜΕΡΗ

1.2.1 Γενικά

Η ικανότητα του άνθρακα που αναφέρθηκε παραπάνω έχει δώσει στη φύση αλλά περισσότερο στους ανθρώπους τη δυνατότητα δημιουργίας μεγάλων συνθετικών δομών άνθρακα που με κατάλληλες μεθόδους χρήζουν πολύτιμα στη βιομηχανία.

Οι δομές αυτές ονομάζονται μακρομόρια και είναι αλυσίδες μορίων με βάση τον άνθρακα. Ένα βασικό τους στοιχείο είναι ότι αποτελούνται από μικρές χημικές ομάδες μερικών ατόμων οι οποίες επαναλαμβάνονται για να δημιουργήσουν αυτή τη μακρομοριακή αλυσίδα. Αυτές οι μικρές χημικές ομάδες ονομάζονται μονομερή και από αυτά παίρνει το τελικό του όνομα το τελικό προϊόν.

Τα μακρομόρια δημιουργούν υλικά μεταξύ των οποίων είναι και τα πολυμερή. Αυτά είναι φυσικές ή συνθετικές χημικές ουσίες. Στα πολυμερή εντάσσονται τα υλικά τα οποία θα μελετηθούν και θα χρησιμοποιηθούν σε αυτή την εργασία, τα θερμοπλαστικά.

Άλλες βασικές κατηγορίες πολυμερών είναι τα θερμοσκληρυνόμενα και τα ελαστομερή. Και οι τρεις βασικές κατηγορίες θα αναπτυχθούν στη συνέχεια.

1.2.2 Θερμοπλαστικά

Τα θερμοπλαστικά πολυμερή είναι μια μεγάλη κατηγορία πολυμερών με ευρεία χρήση στη βιομηχανία. Τα υλικά αυτά παίρνουν το όνομα τους από την πιο σημαντική ιδιότητά τους που σχετίζεται με τη θερμική τους συμπεριφορά. Κατά τη παροχή θερμότητας τα θερμοπλαστικά μαλακώνουν και είναι εύπλαστα έως και υγρά αναλόγως τη θερμοκρασία. Στη συνέχεια αν ψύξουμε το υλικό θα στερεοποιηθεί στο σχήμα που βρίσκεται. Η διαδικασία αυτή στα θερμοπλαστικά μπορεί να επαναληφθεί θεωρητικά άπειρες φορές που σημαίνει πως είναι ανακυκλώσιμα.

Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στη δομή των μακρομοριακών αλυσίδων των θερμοπλαστικών που είναι γραμμικές(τύπου 1D). Έτσι, με την παροχή θερμότητας τα μακρομόρια μπορούν να ολισθαίνουν το ένα δίπλα στο άλλο σχετικά εύκολα με αποτέλεσμα το υλικό να μαλακώνει. Η θερμότητα αυξάνει την εσωτερική ενέργεια του υλικού συνεπώς αυξάνει την κινητικότητα των μακρομοριακών αλυσίδων που «δένονται» μεταξύ τους με ασθενείς διαμοριακούς δεσμούς(διαμοριακές δυνάμεις) όπως: δυνάμεις van der waal's, αλληλεπίδραση διπόλου και δεσμοί υδρογόνου. Περισσότερα για τους διαμοριακούς δεσμούς στην ανάλογη ενότητα.

Τα θερμοπλαστικά πολυμερή έχουν κατακτήσει τον κόσμο των πλαστικών καθώς εκτιμάται πως αποτελούν το 80-85% των παραγόμενων πλαστικών διεθνώς.

Μερικά από τα βασικά θερμοπλαστικά της βιομηχανίας είναι το πολυαιθυλένιο(PE), το πολυβινυλοχλωρίδιο(PVC), το πολυπροπυλένιο(PP), το πολυστυρένιο(PS) και διάφορα πολυαμίδια(nylon). Τα θερμοπλαστικά θα μας απασχολήσουν στην εργασία αυτή.

1.2.3 Θερμοσκληρυνόμενα

Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή είναι μακρομοριακά υλικά που έχουν διαφορετική θερμική συμπεριφορά. Η διαφορά αυτή οφείλεται στη μοριακή δομή τους που είναι τριών διαστάσεων(τύπου 3D) και δημιουργεί πολύπλοκα δίκτυα στο εσωτερικό του υλικού. Αντίθετα με τα θερμοπλαστικά, αυτά συνήθως χρειάζονται παροχή θερμότητας για να πολυμεριστούν και να αποκτήσουν μια συμπαγή μορφή και έπειτα δεν ξαναμαλακώνουν. Η διαδικασία που ακολουθήται σε βασικό επίπεδο είναι η μίξη μιας «θερμοσκληρυνόμενης ρητίνης» με ένα «σκληρυντή» και συνήθως η αύξηση της θερμοκρασίας. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται «θερμοσκλήρυνση» ή «διαδικασία κιούρ» και είναι μη αντιστρεπτή.

Τα θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή είναι σημαντικά για την τεχνολογία καθώς μεταξύ άλλων, αποτελούν τις ισχυρότερες κόλλες και έχουν επικρατήσει στη παραγωγή συνθέτων υλικών για προηγμένες εφαρμογές ενώ αποτελούν το 10-15% των παραγόμενων πολυμερών διεθνώς. Μερικές σημαντικές θερμοσκληρυνόμενες ρητίνες είναι οι εποξικές, οι κυανεστερικές, μερικές πολυουρεθάνες και μερικοί πολυεστέρες.

1.2.4 Ελαστομερή

Τα ελαστομερή είναι πολυμερή αδύναμων διαμοριακών δυνάμεων και είναι συνήθως θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή και ενίοτε θερμοπλαστικά. Αυτό γιατί τα ελαστομερή περνούν πρώτα από μια διαδικασία εν θερμώ προσθήκης θείου(S) που δημιουργεί δεσμούς μεταξύ μακρομοριακών αλυσίδων με σκοπό τη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Η διαδικασία της εν θερμώ προσθήκης θείου ονομάζεται «βουλκανισμός».

Παρ'όλα αυτά, τα ελαστομερή έχουν αποκτήσει τη δική τους κατηγορία πολυμερών λόγω μιας ξεχωριστής τους ιδιότητας. Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται «υπερελαστικότητα» και αναλύεται σε δύο μέρη. Εάν ασκηθεί ένα φορτίο στο υλικό, αυτό θα παραμορφωθεί υπερβολικά. Αν στη συνέχεια αφαιρεθεί το φορτίο το υλικό επανέρχεται 100% στην αρχική του μορφή.

Τα ελαστομερή αντιστοιχούν στο 5% περίπου των παραχθέντων πολυμερών και μερικά βασικά της κατηγορίας είναι το φυσικό ελαστικό ή καουτσούκ και το συνθετικό ελαστικό (φυσικό και συνθετικό πολυισοπρένιο) καθώς και οι σιλικόνες.

1.3 ΕΞΩΘΗΤΕΣ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ

1.3.1 Ορισμός, αρχή λειτουργίας και εφαρμογές

Εξώθηση είναι η διαδικασία κατά την οποία, κατάλληλη διάταξη(extruder), λιώνει την πρώτη ύλη δίνοντας ένα συνεχές προφίλ. Το προφίλ εξαρτάται από το τί προϊόν θα παραχθεί. Ένας εξωθητής πλαστικού βασίζεται στην ιδιότητα των θερμοπλαστικών να λιώνουν και να παραμορφώνονται. Το υλικό εισέρχεται σε ένα θερμαινόμενο θάλαμο και φτάνοντας την επιθυμητή θερμοκρασία εξωθείται μέσω ενός ακροφυσίου με σκοπό να αποκτήσει νέα μορφή και σχήμα ή ακόμα και ιδιότητες. Οι εξωθητές χρησιμοποιούνται σε όλες τις παραγωγικές διαδικασίες πλαστικών στο κόσμο καθώς προσφέρουν τεράστια ευελιξία για την παραγωγή προϊόντων. Από την παραγωγή πλαστικών κόκκων και σκόνης μέχρι την ανακύκλωση οι εξωθητές καλύπτουν όλο το φάσμα παραγωγής και επεξεργασίας. Παραγωγή σωλήνων, κουφωμάτων, πλαστικών ταινιών και φύλλων, μονώσεων καλωδίων και μπουκαλιών είναι μερικές βασικές χρήσεις που εντάσσεται μια τέτοια μηχανή.

1.3.2 Τύποι εξωθητών

Όπως αναφέρθηκε στον ορισμό της εξώθησης, σκοπός είναι η τήξη πλαστικού για την εκ νέου μορφοποίηση του. Το αποτέλεσμα αυτό δεν επιτυγχάνεται με μόνο μία συγκεκριμένη διάταξη εξωθητή και έτσι υπάρχουν τρεις διαφορετικοί τύποι αυτών:

1. **Εξωθητής με έμβολο:** Πρόκειται για τον πρώτο τύπο εξωθητή που υπάρχει. Ο εξωθητής με έμβολο είναι ένας απλός εξωθητής ο οποίος περιέχει στο θάλαμο του ένα έμβολο. Καθώς το έμβολο κινείται παλινδρομικά, ωθεί το

θερμοπλαστικό πολυμερές προς το καλούπι. Ο θάλαμος θερμαίνεται με θερμικές αντιστάσεις.

2. **Εξωθητής με περιστρεφόμενο κοχλία:** Οι εξωθητές με περιστρεφόμενο κοχλία έχουν την ίδια αρχή λειτουργίας χρησιμοποιούν κοχλία για την εξώθηση του πολυμερούς. Έτσι η διαδικασία γίνεται πιο αυτοματοποιημένη και βελτιώνει την παραγωγικότητα. Οι εξωθητές αυτού του τύπου είναι οι πλέον διαδεδομένοι και είναι αυτοί με τους οποίους θα πραγματευτεί η συγκεκριμένη εργασία.
3. **Εξωθητής με δύο κοχλίες:** Ακολουθούν τη λογική των παραπάνω αλλά αποτελούνται από δύο κοχλίες που στρέφονται ομόρροπα. Οι εξωθητές με δύο κοχλίες (twin-screw extruders) χρησιμοποιούνται κυρίως για την μίξη διαφορετικών πολυμερών (compounding) ή για αύξηση της παραγωγικότητας.

1.4 ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΗΣ ΜΗΤΡΑΣ

1.4.1 Ορισμός σύνθετου υλικού

Ως σύνθετο υλικό ορίζεται το υλικό που αποτελείται από δύο ή περισσότερα επιμέρους υλικά, τα οποία συνδυάζονται για να επιτευχθούν ειδικές ιδιότητες ή χαρακτηριστικά που κανένα από τα συμμετέχοντα υλικά δεν μπορεί από μόνο του να πετύχει.[17] Γενικά τα σύνθετα υλικά αποτελούνται πρώτον από την ενισχυτική φάση που προσδίδει στο σύνθετο βελτιωμένες μηχανικές κυρίως ιδιότητες. Η δεύτερη φάση είναι συνήθως χαμηλής πυκνότητας και σημαντική για το τελικό βάρος, τη συνοχή με την ενισχυτική φάση και γενικότερα για τις φυσικές και χημικές ιδιότητες του σύνθετου. Η φάση αυτή ονομάζεται μήτρα. Ανάλογα με τη μορφή του συστατικού ενίσχυσης, τα σύνθετα κατατάσσονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες[17]:

1. Σύνθετα υλικά με ενίσχυση ινών (fibrous composites)
2. Σύνθετα υλικά με ενίσχυση σωματιδίων (particulate composites)
3. Πολυστρωματικά σύνθετα υλικά (laminar composites)

Να σημειωθεί πως η επιλογή της μήτρας στα θερμοπλαστικά σύνθετα δεν είναι εύκολη υπόθεση για το λόγο του ότι πολύ παράγοντες συντρέχουν σε αυτή που σχετίζονται με τις μηχανικές, φυσικές και χημικές ιδιότητες της μήτρας. Για παράδειγμα, η χαμηλή πυκνότητα του LDPE (low density polyethylene) οδηγεί σε χαμηλό μέτρο ελαστικότητας και δεν συνιστάται για τη χρήση του ως μήτρα, αλλά με το χαμηλό σημείο τήξης του δύναται να λιώνει για να ανακυκλωθεί, χωρίς να καταστρέφονται οι ενισχυτικές ίνες.

1.4.2 Ενίσχυση θερμοπλαστικών

Τα βασικά πλεονεκτήματα των σύνθετων με θερμοπλαστική μήτρα συγκριτικά με αυτά θερμοσκληρυνόμενης μήτρας έχουν νόημα όταν το υλικό βρίσκεται σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Αντοχή σε θραύση, αντοχή σε κρούση και η δυνατότητα να αναδιαμορφώνονται είναι τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα. Επίσης

δεν έχουν περιορισμένη διάρκεια αποθήκευσης όπως τα θερμοσκληρυνόμενα που όταν βρίσκονται σε προπολυμερισμένο στάδιο (stage B pre-pregs), έχουν ζωή μόλις μερικούς μήνες.

Το μεγάλο μειονέκτημα τους είναι ότι για οποιαδήποτε παραγωγή και επεξεργασία πρέπει να βρεθούν σε υψηλές θερμοκρασίες, γεγονός που μειώνει την ευελιξία των διαδικασιών και δυσκολεύει τη συνάφεια ενίσχυσης-μήτρας. Η ενίσχυση θερμοπλαστικών γίνεται με κοντές, μακριές, συνεχείς ίνες (SFRTs, LFRTs, CFRTs αντίστοιχα) ή μικροσωματίδια (π.χ CNTs). Οι ίνες που χρησιμοποιούνται είναι συνήθως είναι γυαλιού (glass mat thermoplastics) και άνθρακα για πιο προηγμένες εφαρμογές.[12] Επίσης χρησιμοποιούνται θερμοπλαστικές ίνες όταν υπάρχει ανάγκη για οικονομικό και σχετικά ανθεκτικό υλικό.

Μικροσωματίδια όπως νανοσωλήνες άνθρακα ενισχύουν τη θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα της μήτρας, ιδιότητες σημαντικές για εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, την αεροναυπηγική και την αεροδιαστημική. Τα υλικά μήτρας που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι πολυπροπυλένιο (PP), πολυαμίδια (PA ή Nylon), πολυαιθυλένιο τereφθαλικό (PET), πολυαιθεροϊμίδιο (PEI), πολυαιθεροαιθεροκετόνη (PEEK) για προηγμένες εφαρμογές.

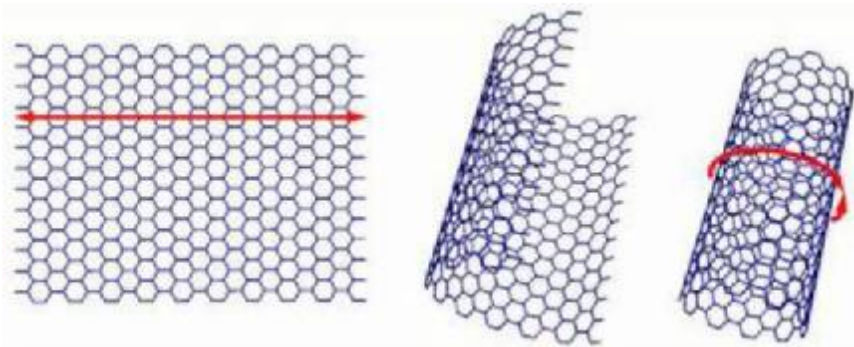
1.4.3 Νανοσωλήνες άνθρακα (CNTs)

Στα μέσα της δεκαετίας του 1980 αναπτύσσεται η χημεία των φουλλερενίων – μορίων των οποίων η δομή παρομοιάζει κλειστά κελιά από άτομα άνθρακα σε πενταγωνικές και εξαγωνικές διατάξεις. Το όνομα τους προέρχεται από τον αρχιτέκτονα R. Buckminster Fuller, ο οποίος έγινε γνωστός για το σχεδιασμό γεωδαιτικών θόλων αποτελούμενων από πεντάγωνα και εξάγωνα. Το πρώτο τέτοιο μόριο που διαμορφώθηκε και μελετήθηκε είναι το C₆₀ – γνωστό και ως buckminsterfullerene – ένα μόριο 60 ατόμων άνθρακα στο οποίο κάθε πλευρά κάθε πεντάγωνου γειτονεύει με εξάγωνο, όπως μια μπάλα ποδοσφαίρου (αναφέρεται και ως bucky ball). Λίγα χρόνια αργότερα, η ανακάλυψη αυτή, οδήγησε στη σύνθεση των νανοσωλήνων άνθρακα. Οι νανοσωλήνες αυτοί, είναι επιμήκη μόρια φουλλερενίων στα οποία τα τοιχεία αποτελούνται από εξαγωνικές διατάξεις (γραφική δομή) και συχνά είναι κλειστά σε κάθε άκρο με ημισφαίρια φουλλερενίων.[18]

Οι σχηματισμοί αυτοί παρομοιάζουν κελί και οι ιδιαίτερες ιδιότητες τους απορρέουν από τη συμμετρία στη δομή τους. Παρά τις διαφορές στις βιβλιογραφικές αναφορές πάνω στις ιδιότητες των νανοσωλήνων, θεωρητικά μοντέλα αλλά και πειραματικά δεδομένα δείχνουν εξαιρετικά υψηλό μέτρο ελαστικότητας που ξεπερνά το 1TPa και οι καταγεγραμμένες αντοχές είναι κατά 10-100 φορές μεγαλύτερες από το ισχυρότερο χάλυβα. Με δεδομένα αυτές τις τιμές, οι νανοσωλήνες δείχνουν να είναι ικανοί να δημιουργήσουν μια ολόκληρη νέα κατηγορία προηγμένων υλικών.

Όμως δεν εκπλήσσουν μόνο οι μηχανικές τους ιδιότητες, καθώς συνδυάζουν υψηλές θερμικές και ηλεκτρικές ιδιότητες: είναι θερμικά σταθεροί μέχρι τους 2800°C υπό κενό, η θερμική τους αγωγιμότητα είναι συγκρίσιμη με το γραφίτη και η ηλεκτρική τους χωρητικότητα είναι περίπου 1000 φορές μεγαλύτερη από αυτή του χαλκού.[18] Οι νανοσωλήνες άνθρακα είναι νέα καινοτόμα υλικά τα οποία μπορούν να έχουν διάμετρο μικρότερη από 1 nm – ένας νανοσωλήνας άνθρακα μπορεί να είναι 10,000 φορές μικρότερος από μια ανθρώπινη τρίχα! Το μήκος τους μπορεί να φτάσει τα αρκετά μικρόμετρα (1μm = 10000nm) και συνεπώς ο λόγος μήκος προς διάμετρο, είναι τυπικά πολύ μεγάλος και συνήθως στην τάξη των χιλιάδων.

Οι νανοσωλήνες άνθρακα έχουν στεφθεί βασιλιάς της νανοτεχνολογίας εξαιτίας των μοναδικών και εκπληκτικών τους ιδιοτήτων. Εκτός από τη μοναδική τους μικροδομή, οι νανοσωλήνες άνθρακα επιδεικνύουν εξαιρετικά χρήσιμες δομικές, ηλεκτρικές, θερμικές και χημικές ιδιότητες και έτσι επιτρέπουν σε πολλά υλικά να γίνουν πιο ελαφρά, πιο ανθεκτικά, φθηνότερα, καθαρότερα και πιο αποδοτικά. Με απλά λόγια, υπάρχουν δυο τύποι λεκτικής αγωγιμότητας στους CNTs, ανάλογα με τη διεύθυνση των εξάγωνων του γραφιτικού επιπέδου που τους αποτελούν. Οι νανοσωλήνες άνθρακα μπορούν να παρασταθούν ως γραφιτικά επίπεδα που έχουν τυλιχθεί σε κύλινδρο.



Εικόνα 1.1: Γραφικό επίπεδο και νανοσωλήνας άνθρακα μετά από τύλιγμα

Οι νανοσωλήνες υπάρχουν είτε ως μόνου-τοιχίου (SWCNTs – Single Walled Carbon NanoTubes), είτε ως πολλαπλών-τοιχίων (MWCNTs – Multi Walled Carbon NanoTubes). Η δομή των MWCNTs αποτελείται απλά από πολλούς ομόκεντρους SWCNTs. [16]

1.4.4 Εφαρμογές σύνθετων θερμοπλαστικής μήτρας

Οι κυριότερες εφαρμογές των ενισχυμένων θερμοπλαστικών είναι στην αυτοκινητοβιομηχανία, στην αεροναυπηγική, στην παραγωγή ανθεκτικών εξαρτημάτων όπως σωληνώσεις, ενώ επεκτείνεται και σε αεροδιαστημικές εφαρμογές.

Οι νανοσωλήνες άνθρακα βελτιώνουν δραματικά την ηλεκτρική και θερμική αγωγιμότητα των θερμοπλαστικών και ανοίγουν ένα μεγάλο κομμάτι της βιομηχανίας μέσω μορφοποίησης από εξωθητές για την παραγωγή εξαρτημάτων ηλεκτροστατικής εκφόρτισης, ηλεκτρικά αγώγιμα τμήματα, εξαρτήματα στο πλαίσιο καυσίμων για την αυτοκινητοβιομηχανία (παρουσιάζουν υψηλή χημική σταθερότητα), σωλήνες και συνδέσεις.[16]

Η εταιρία Airbus, με άρθρο στη σελίδα της υποστηρίζει τα θερμοπλαστικά σύνθετα, συγκεκριμένα τα σύνθετα με ενίσχυση ανθρακονημάτων και αναφέρει: “Με τα θερμοπλαστικά σύνθετα, μπορείς να λιώσεις ένα τελικό κομμάτι και να το αναδιαμορφώσεις και να έχει ακόμα την ίδια χημική σύνθεση”, τονίζοντας το πλεονέκτημα των θερμοπλαστικών, και συνεχίζει: “Αυτή η διαφορά κάνει τα θερμοπλαστικά σύνθετα πολύ ελκυστικά. Γιατί; Επειδή η Airbus και οι προμηθευτές της παράγουν κυριολεκτικά εκατοντάδες τόνους απορριμμάτων θερμοπλαστικών κάθε χρόνο”. Αξίζει να σημειωθεί πως η εταιρία χρησιμοποιεί περισσότερα από 1500 κομμάτια των εν λόγω υλικών στα επιβατικά της, αριθμός που όλο αυξάνεται.

1.5 ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ

1.5.1 Εισαγωγή

Τρισδιάστατη εκτύπωση(3D printing) είναι μία μέθοδος κατασκευής αντικειμένων μέσω διαδοχικής πρόσθεσης στρώσεων υλικού. Στην εν λόγω εκτύπωση χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο πλαστικά υλικά (συγκεκριμένα θερμοπλαστικά). Κατά τη διαδικασία εκτύπωσης ένα ακροφύσιο κινούμενο στο επίπεδο χύνει λιωμένο πλαστικό σε μία επίπεδη θερμαινόμενη τράπεζα η οποία κινείται στον τρίτο άξονα για να δώσει πάχος στο τελικό αντικείμενο.

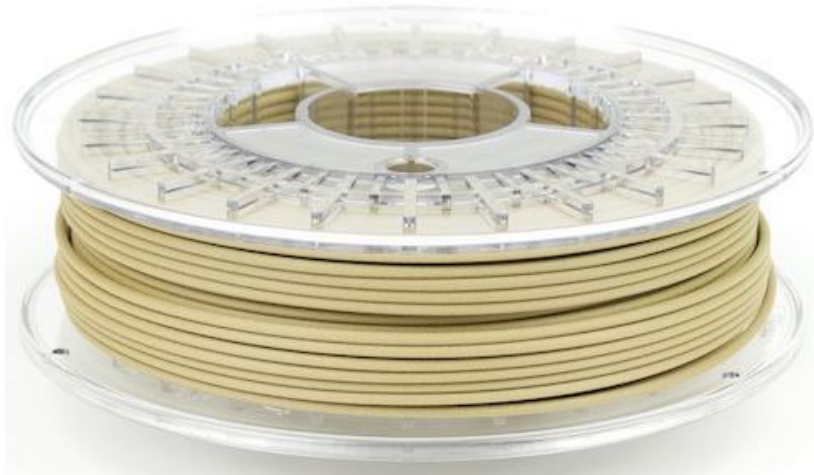
Το ακροφύσιο κινείται μέσω βηματικών κινητήρων για μεγαλύτερη ακρίβεια και ο προγραμματισμός τους γίνεται μέσω μικροελεγκτή (microcontroller). Οι 3D εκτυπωτές είναι γρήγοροι και εύκολοι στη χρήση και βρίσκουν εφαρμογές κυρίως στη κατασκευή φυσικών μοντέλων και πρωτότυπων από σχεδιαστές, μηχανικούς και άλλες ομάδες έρευνας και ανάπτυξης νέων προϊόντων.

1.5.2 Σύνθετα υλικά στη τρισδιάστατη εκτύπωση

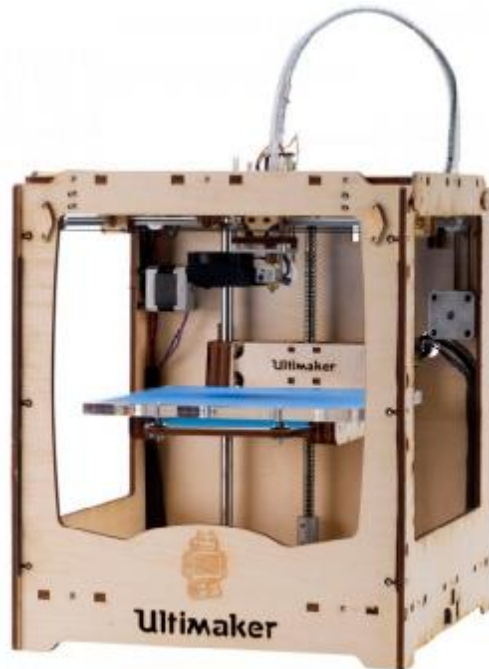
Καθώς η διαδικασία της τρισδιάστατης εκτύπωσης συνεχώς αναβαθμίζεται(μεγαλύτερη ακρίβεια, ταχύτερη εκτύπωση), δίνεται η δυνατότητα παραγωγής όχι μόνο πρωτότυπων αντικειμένων αλλά και τελικών προϊόντων με ανθεκτικότερα υλικά.

Αυτά τα υλικά είναι σαφώς θερμοπλαστικά αλλά περιέχουν ενισχύσεις όπως μικρο-ίνες ή νανοσωματίδια. Οι ενισχύσεις αυτές προσφέρουν αυξημένες μηχανικές και φυσικές ιδιότητες(όπως θερμικές και ηλεκτρικές), ανάλογα με την εφαρμογή για την οποία προορίζονται.

Οι εταιρίες παραγωγής νήματος για εκτυπωτές έχουν πλέον φτάσει σε σημείο να παράγουν πλαστικά με τη προσθήκη σωματιδίων χαλκού, σιδήρου, ινών bamboo και νανοσωλήνων άνθρακα.



Εικόνα 1.2: Νήμα με ίνες bamboo από την colorfab



Εικόνα 1.3: 3D εκτυπωτής της ultimaker.

2 ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ

2.1 ΧΗΜΕΙΑ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ

2.1.1 Πολυμερισμός

Πολυμερισμός είναι η διαδικασία ένωσης μονομερών για τη δημιουργία μακρομοριακών αλυσίδων και την παραγωγή του πολυμερούς. Ο αριθμός των μονομερών που θα ενωθούν μεταξύ τους για τη δημιουργία της αλυσίδας ορίζει το βαθμό πολυμερισμού του υλικού. Για παράδειγμα, αν κατά τη διάρκεια πολυμερισμού έχουμε την ένωση 1000 μονομερών τότε έχουμε βαθμό πολυμερισμού 1000. Ο βαθμός πολυμερισμού καθορίζει το μοριακό βάρος (M.B) του μακρομορίου και ορίζεται με τον εξής τύπο:

$$\text{βαθμός πολυμερισμού} = \frac{\text{μοριακό βάρος μακρομορίου}}{\text{μοριακό βάρος μονομερούς}} \quad (2.1)$$

Η διαδικασίες πολυμερισμού διακρίνονται στις «απλές αντιδράσεις πολυμερισμού» και στις «αντιδράσεις συμπύκνωσης». Συγκεκριμένα:

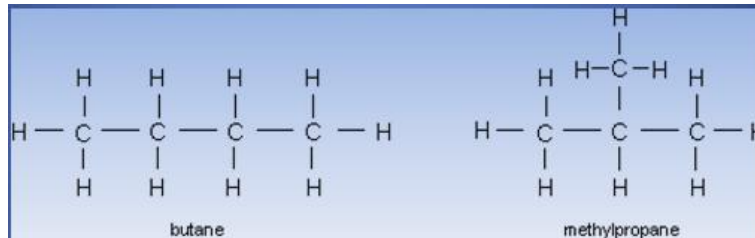
1. Απλές αντιδράσεις πολυμερισμού. Αυτές είναι αλυσιδωτές αντιδράσεις που συμβαίνουν μεταξύ χημικών ομάδων με ακόρεστους χημικούς δεσμούς. Βασικό χαρακτηριστικό τους είναι ότι συμβαίνουν γρήγορα, με τη προσθήκη ενός κάθε φορά μονομερούς επαναληπτικά, μέχρι την ολοκλήρωση της μακρομοριακής αλυσίδας.
2. Αντιδράσεις συμπύκνωσης. Αυτές είναι πιο σύνθετες αντιδράσεις που συμβαίνουν με τη προϋπόθεση ότι μεταξύ των μορίων του υλικού που αντιδρούν, υπάρχουν δύο τουλάχιστον ενεργές χημικές ομάδες ατόμων. Ο όρος συμπύκνωση προέρχεται από την ένωση αυτών των ενεργών ομάδων. Κατά την διαδικασία αυτή έχουμε την ταυτόχρονη αποβολή μορίων όπως νερού και αμμωνίας.

2.1.2 Ισομέρεια

Η ισομέρεια είναι κομμάτι της στερεοχημείας των πολυμερών. Πρόκειται για την ιδιότητα των ενώσεων των μονομερών να έχουν διαφορετική χωροδιάταξη με την ίδια χημική σύσταση. Η διαφορετική χωροδιάταξη σχετίζεται με τη θέση των ατόμων στο μονομερές αλλά και με τις γωνίες των δεσμών που δημιουργούνται μεταξύ των ατόμων στο χώρο. Η θέση των ατόμων είναι πολύ σημαντική στην επιστήμη των πολυμερών καθώς η παραμικρή αλλαγή σε αυτή έχει ως αποτέλεσμα την μεταβολή των ιδιοτήτων υλικού.

Η ικανότητα που έχουν ομάδες μορίων να περιστρέφονται στο χώρο επιφέρει ισομερείς καταστάσεις και εξαρτάται από τον υπάρχων δεσμό. Αν δύο άτομα συνδέονται με διπλό ομοιοπολικό δεσμό (ενδομοριακή δύναμη), ο δεσμός είναι ισχυρότερος και δεν επιτρέπει τη περιστροφή των ατόμων.

Για παράδειγμα, η ένωση με χημικό τύπο C_4H_{10} μπορεί να είναι βουτάνιο ή μεθυλοπροπάνιο.



Εικόνα 2.1: Ισομερή χημικής ομάδας C_4H_{10} . Βουτάνιο(αριστερά) και μεθυλοπροπάνιο(δεξιά)

2.1.3 Κρυσταλλικότητα

Η κρυσταλλικότητα είναι μια ιδιότητα της μικροδομής των πολυμερών να δημιουργούν επαναλαμβανόμενες κανονικές δομές ανά συγκεκριμένο όγκο και εξαρτάται από τέσσερις σημαντικούς παράγοντες.

Ο πρώτος παράγοντας αφορά τη χημική δομή και το γεωμετρικό σχήμα των μακρομοριακών αλυσίδων του υλικού. Απλά, γραμμικά μακρομόρια έχει αποδειχτεί ότι είναι ευκολότερο να δημιουργήσουν κρυσταλλικές δομές. Αντίθετα, χημικές ομάδες με διακλαδώσεις και ογκώδης ενώσεις δεν είναι εύκολο να επιτύχουν.

Ο δεύτερος παράγοντας αφορά τις διαμοριακές δυνάμεις. Η ύπαρξη δεσμών υδρογόνου μεταξύ των αλυσίδων έχει αποδειχτεί ότι ενισχύει τη σταθερότητα και τη συνοχή της ήδη υπάρχουσας κρυσταλλικής δομής.

Ο τρίτος παράγοντας είναι ξανά χωροδιαταξιακού χαρακτήρα. Αφορά την ικανότητα των μακρομορίων να περιστρέφονται στο χώρο γύρω από απλούς χημικούς δεσμούς(ευληγησία των αλυσίδων), όπως π.χ C-N-C και έτσι να έρχονται σε θέσεις κατάλληλες για κρυσταλλικές περιοχές. Η ευλυγισία της αλυσίδας ελαττώνεται εξαιρετικά όταν άτομα άνθρακα δημιουργούν διπλούς ομοιοπολικούς δεσμούς (π.χ C=C).

Ο τελευταίος παράγοντας σχετίζεται με τη ψύξη του πλαστικού και συγκεκριμένα με το ρυθμό ψύξης του. Αν οι ρυθμοί ψύξης είναι υψηλοί, τα μόρια δεν προλαβαίνουν να οργανωθούν στο χώρο καθώς δέχονται ένα θερμικό σοκ. Έτσι μένουν άτακτα στο χώρο και δημιουργούν άμορφες δομές.

Αν οι ρυθμοί είναι χαμηλοί τότε τα μόρια προλαβαίνουν να χωροδιαταχθούν σε κανονικούς επαναλαμβανόμενους σχηματισμούς και δημιουργούν κρυσταλλικές δομές.

Κάθε πολυμερές έχει δύο είδη δομής, τη «κρυσταλλική» και την «άμορφη». Το ποσοστό της εκάστοτε δομής κατατάσσει τα πολυμερή σε κρυσταλλικά, ημικρυσταλλικά και άμορφα.

Κάτω από ιδανικές πειραματικές συνθήκες αποδεικνύεται πως η κρυσταλλικότητα ενός πολυμερούς δεν μπορεί να ξεπεράσει το 90% ενώ το ποσοστό στα συνήθη πλαστικά κυμαίνεται από 50-60%.

Η κρυσταλλικότητα είναι μια πολύ σημαντική ιδιότητα των πολυμερών που επιδρά σε φυσικές, χημικές και μηχανικές ιδιότητες του όπως στις σημαντικές θερμοκρασίες μεταβολής του, στα οπτικά του χαρακτηριστικά και στη συστολή του υλικού.

2.1.4 Σημαντικές θερμοκρασίες μεταβολής

Ένα πολυμερές χαρακτηρίζεται από τρεις βασικές θερμοκρασίες μεταβολής, τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης(T_g), τη θερμοκρασία κρυσταλλικότητας(T_c) και τη θερμοκρασία τήξης(T_m). Αναλυτικότερα:

1. **Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης(T_g).** Είναι χαρακτηριστικό της άμορφης δομής του πολυμερούς. Κάτω από αυτή τη θερμοκρασία το υλικό έχει σταθερές μηχανικές ιδιότητες ενώ με την υπέρβαση της, οι ιδιότητες αλλοιώνονται. Την ίδια χρονική στιγμή η άμορφη δομή γίνεται ρευστή και το υλικό αρχίζει να μαλακώνει ή να γίνεται πιο εύκαμπτο. Η θερμοκρασία αυτή καθορίζει το εύρος θερμοκρασίας για το οποίο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ένα υλικό σε μια εφαρμογή.
2. **Θερμοκρασία κρυσταλλικότητας(T_c).** Βρίσκεται ανάμεσα στη θερμοκρασία T_g και T_m . Είναι η θερμοκρασία κατά την οποία αν παραμείνει το υλικό για κάποιο χρονικό διάστημα, τα μόρια του υλικού αναδιατάσσονται σε κρυσταλλικές δομές μέσω μιας εσώθερμης μεταβολής.
3. **Θερμοκρασία τήξης(T_m).** Πρόκειται για χαρακτηριστικό της κρυσταλλικής δομής. Όταν το υλικό φτάσει αυτή τη θερμοκρασία έχουμε την καταστροφή των τελευταίων κρυστάλλων, την πλήρη αταξία της μικροδομής και την τήξη του πολυμερούς. Κατά τη θερμοκρασία αυτή το υλικό αρχίζει να ρέει.

2.1.5 Μοριακό βάρος

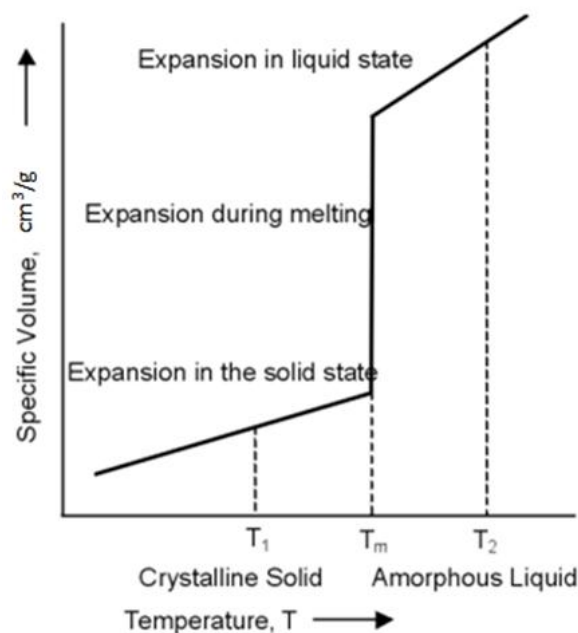
Στη ενότητα πολυμερισμού αναλύθηκε η αρχή παραγωγής των πολυμερών με αναφορά στα μοριακά βάρη τους. Στο σημείο αυτό πρέπει να ξεκαθαριστεί πως όταν αναφερόμαστε στο μοριακό βάρος(M.B) του πολυμερούς μιλάμε για το συνολικό βάρος της μακρομοριακής αλυσίδας και όχι για το μοριακό βάρος του μονομερούς που την αποτελούν.

Στη περίπτωση αυτή, ο όρος μοριακό βάρος δεν έχει φυσική σημασία καθώς δεν είναι εφικτό κατά τον πολυμερισμό όλα τα μακρομόρια να αποτελούνται από τον ίδιο ακριβώς αριθμό μονομερών. Έτσι, το M.B έχει στατιστική έννοια και είναι μία μέση τιμή όπως κατ' επέκταση και ο βαθμός πολυμερισμού(εξίσωση 1.1). Η μελέτη του M.B γίνεται ακόμη πιο πολύπλοκη όταν κατά τον πολυμερισμό έχουμε περισσότερες της μιας χημικές ομάδες(περίπτωση συμπολυμερών).

2.1.6 Ειδικός όγκος

Όταν ένα κρυσταλλικό πολυμερές θερμαίνεται από στερεά κατάσταση διαστέλλεται με σταθερό ρυθμό εξαρτώμενο από το συντελεστή θερμικής διαστολής του. Στο σημείο τήξης το πολυμερές υπόκειται σε μια μεγάλη αύξηση του όγκου μέχρις ότου αρχίσει να διαστέλλεται με σταθερό ρυθμό στην υγρή κατάσταση.

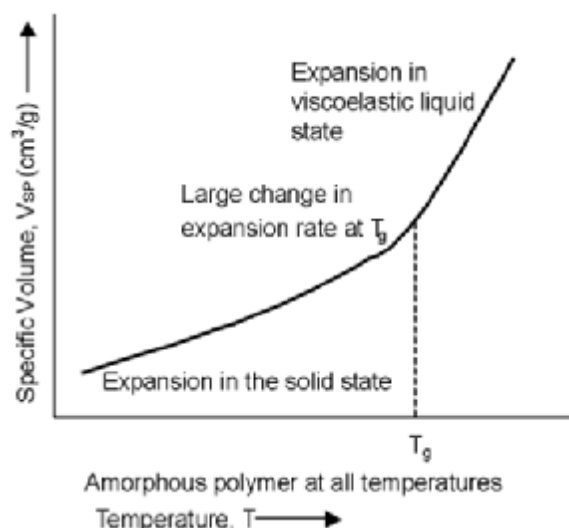
Η μεγάλη διόγκωση, ή αύξηση του ελεύθερου όγκου, συμβαίνει τη στιγμή που οι αλυσίδες στη κρυσταλλική κατάσταση σπάνε σε άμορφη δομή.



Εικόνα 2.2: Μεταβολή ειδικού όγκου συναρτήσει της θερμοκρασίας για κρυσταλλική μάζα

Ένα άμορφο πολυμερές ποτέ δεν λιώνει με τον τρόπο που λιώνει ένα ημικρυσταλλικό πολυμερές. Αντί αυτού, γίνεται προοδευτικά λιγότερο παχύρευστο όσο ανεβαίνουμε από την T_g. Όταν ένα άμορφο πολυμερές ψύχεται στην υγρή μορφή του, συστέλλεται με αργό ρυθμό με βάση το συντελεστή θερμικής διαστολής. Το ιξώδες αυξάνεται με σταθερό ρυθμό.

Κάτω από την T_g ο ρυθμός συστολής μειώνεται σε σχέση με το ρυθμό που το ιξώδες αυξάνεται λόγω δομικής ανακατανομής των μακρομοριακών αλυσίδων μέσα στην άμορφη υαλώδη κατάσταση.



Εικόνα 2.3: Μεταβολή ειδικού όγκου συναρτήσει της θερμοκρασίας για άμορφη μάζα

2.1.7 Διαμοριακές δυνάμεις

Τα άτομα που συγκροτούν τη μοριακή αλυσίδα του πολυμερούς συνδέονται με ομοιοπολικούς δεσμούς οι οποίοι είναι πολύ ισχυροί. Αυτό συμβαίνει όταν δύο άτομα συνεισφέρουν ηλεκτρόνια της εξωτερικής τους στοιβάδας το ένα στο άλλο. Για να δημιουργηθεί όμως ένα στιβαρό στερεό σώμα δεν φτάνει αυτό. Σε αυτό συμβάλλουν ελκτικές δυνάμεις που ονομάζονται διαμοριακές δυνάμεις.

Αυτές είναι ελκτικές δυνάμεις ηλεκτροστατικού χαρακτήρα, (ασθενέστερες από τις ενδομοριακές), μεταξύ ατόμων διαφορετικών ή και των ίδιων μορίων της μάζας του υλικού. Πρόκειται για πολύ σημαντική παράμετρο στην επιστήμη πολυμερών διότι όσο μεγαλύτερο είναι το σύνολο τους τόσο πιο στιβαρό και ανθεκτικό σε μηχανικές, θερμικές και χημικές καταπονήσεις θα είναι το τελικό αποτέλεσμα.

Τρεις τύποι τέτοιων αλληλεπιδράσεων θεωρούνται σημαντικοί στα πλαστικά, και αυτοί είναι: Οι δυνάμεις Van Der Waal's, η αλληλεπίδραση διπόλου και οι δεσμοί υδρογόνου.

1. **Δυνάμεις Van Der Waal's.** Είναι δεσμοί που παρατηρούνται μεταξύ όλων των μορίων. Συμβάλλουν σε μικρό βαθμό στις διαφορές μεταξύ των διάφορων πολυμερών.
2. **Αλληλεπίδραση διπόλου.** Παρατηρούνται όταν τα μόρια ή απλά τα άτομα των μορίων παρουσιάζουν πολικότητα ή μη ισορροπημένη ηλεκτρική φόρτιση. Οι συνδυασμοί C-CL, C-F και C=O δείχνουν μόνιμα δίπολα.[1]
3. **Δεσμοί υδρογόνου.** Είναι οι ισχυρότεροι των διαμοριακών δεσμών. Οι δεσμοί υδρογόνου αποτελούν ιδιαίτερη περίπτωση διπολικών αλληλεπιδράσεων και απαιτούν τη παρουσία υδρογόνου και οξυγόνου ή υδρογόνου και αζώτου. Θεωρούνται πολύ σημαντικοί δεσμοί και για καλύτερη αντίληψη της επίδρασης τους, αρκεί να δει κανείς τις φυσικές ιδιότητες του νερού και του μεθανίου. Το μόριο νερού έχει σημείο τήξης 0 οC και σημείο βρασμού 100 οC , ενώ το μεθάνιο -183 οC και -162 οC αντίστοιχα. Οι συνδυασμοί C-OH και N-H δείχνουν την ύπαρξη δεσμών υδρογόνου.[1]

Όταν υπάρχουν στο μόριο μόνιμα δίπολα και δεσμοί υδρογόνου , οι ιδιότητες του υλικού αλλάζουν. Για παράδειγμα, το νάιλον 6 έχει ένα δίπολο και έναν δεσμό υδρογόνου κάθε 6 άτομα άνθρακα στη κύρια αλυσίδα ενώ το νάιλον 12 κάθε 12 άτομα άνθρακα. Ως αποτέλεσμα το πρώτο έχει θερμοκρασία τήξης 220οC και αντοχή εφελκυσμού 78 MPa και το δεύτερο 175 οC και αντοχή σε εφελκυσμό 50 Mpa.

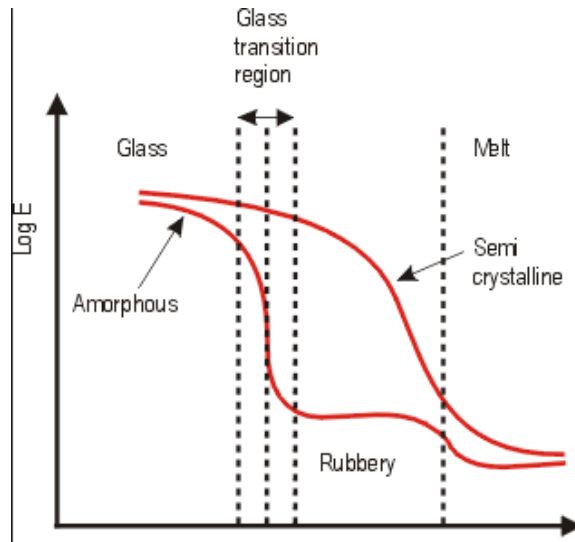
2.1.8 Παράγοντες επηρεασμού μηχανικών ιδιοτήτων θερμοπλαστικών

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις μηχανικές ιδιότητες ενός πλαστικού είναι οι παρακάτω:

1. Θερμοκρασία
2. Βαθμός κρυσταλλικότητας
3. Μοριακό βάρος
4. Διαμοριακές δυνάμεις

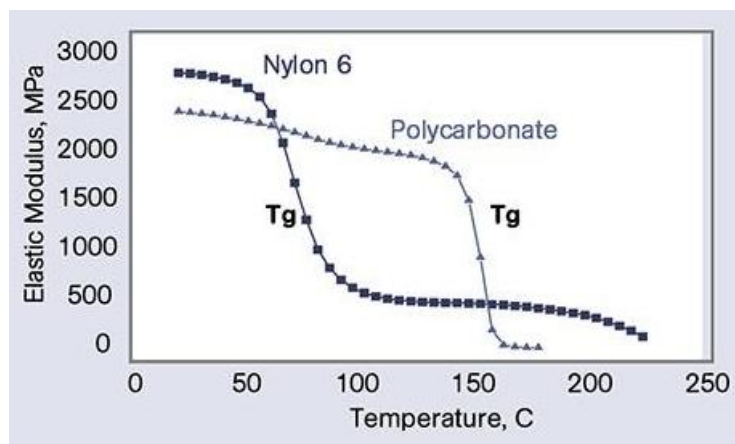
1. **Θερμοκρασία.** Η επίδραση της θερμοκρασίας συνοψίζεται σε μια γραφική παράσταση όπου ο οριζόντιος άξονας είναι η θερμοκρασία του υλικού, και ο

κατακόρυφος παριστάνει το μέτρο ελαστικότητας του Young (σε λογαριθμική κλίμακα). Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας δύο πλαστικών, όπου γίνεται η υπόθεση πως έχουν ίδια T_g και T_m . Το ένα είναι ημικρυσταλλικό και το άλλο άμορφο πολυμερές.



Εικόνα 2.4: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας(E) συναρτήσει της θερμοκρασίας για πλαστικά με ίδια T_g και T_m

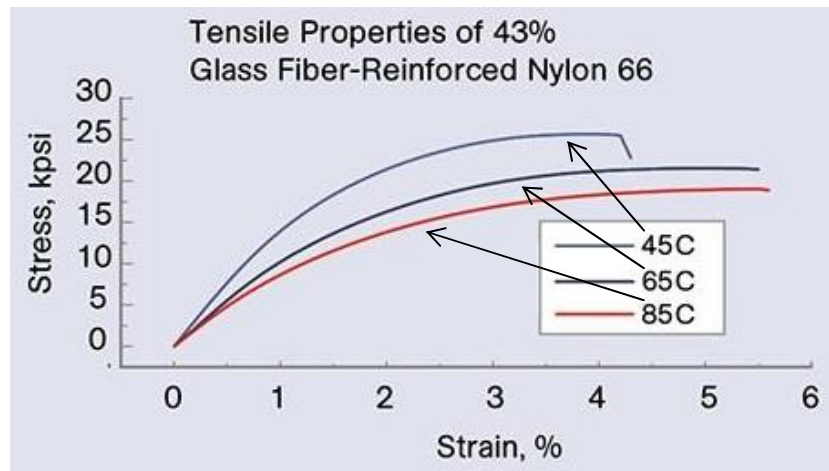
Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ξανά η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας αλλά αυτή τη φορά για ημικρυσταλλικό πολυαμίδιο νάιλον 6, και για άμορφο πολυκαρβονικό. Τα δύο υλικά όπως είναι φυσικό έχουν διαφορετικές θερμοκρασίες μεταβολής.



Εικόνα 2.5: Μεταβολή μέτρου ελαστικότητας(E) συναρτήσει της θερμοκρασίας για νάιλον 6 και πολυκαρβονικό[11]

Το συμπέρασμα που βγαίνει από τα διαγράμματα είναι πως τα άμορφα πολυμερή, (π.χ. το πολυκαρβονικό του σχήματος), έχουν πιο απότομη πτώση του E γύρω από τη θερμοκρασία T_g που τείνει στο μηδέν. Τα ημικρυσταλλικά πολυμερή στο ίδιο εύρος θερμοκρασίας έχουν σχετικά μικρότερο ρυθμό πτώσης μέχρι μία τιμή του E , το οποίο έπειτα φθίνει ομαλά. Η συμπεριφορά αυτή είναι ανάλογη της κρυσταλλικότητας του υλικού (οι κρύσταλλοι αρχίζουν να σπάνε μετά την T_g).

Άλλος ένας τρόπος να αντιληφθεί κανείς την επίδραση της θερμοκρασίας στις μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών είναι ένα σχεδιάγραμμα τάσης-επιμήκνησης(εφελκυσμός) όπως αυτό που ακολουθεί:



Εικόνα 2.6: Πείραμα εφελκυσμού σε 43% ενισχυμένο με υαλόνημα νάιλον 66 για διαφορετικές θερμοκρασίες[11]

Από το γράφημα είναι προφανές πως όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, τόσο πιο μαλακό γίνεται το υλικό και μειώνει τις πιθανότητες να χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές.

- 2. Βαθμός κρυσταλλικότητας.** Από πειράματα έχει διαπιστωθεί ότι για ορισμένη θερμοκρασία, η αύξηση του βαθμού κρυσταλλικότητας οδηγεί σε μια αύξηση του μέτρου ελαστικότητας και συνεπώς των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού. Πιο συγκριμένα, η αύξηση αυτή μεταφράζεται σε μια μετατόπιση της καμπύλης του σχήματος 1.3. προς τα άνω. Επιπλέον, μικρά ποσοστά κρυσταλλικότητας κάνουν το πλαστικό πιο ψαθυρό και σπάει εύκολα. Όταν το ποσοστό είναι υψηλό, τα υλικά έχουν μεγαλύτερη αντοχή σε κρούση που είναι ο πλέον σημαντικός (μηχανικά) λόγος στην επιλογή θερμοπλαστικών σε προηγμένες εφαρμογές.
- 3. Μοριακό βάρος.** Το μοριακό βάρος των πολυμερών συνδέεται άμεσα με το βαθμό πολυμερισμού των μακρομοριακών αλυσίδων του όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα πολυμερισμός. Για πολυμερή μικρού M.B η αντίσταση που εμφανίζουν στην άσκηση εφελκυστικής τάσης είναι πολύ μικρή, που σημαίνει ότι δεν ενδείκνυνται για εφαρμογές τέτοιου τύπου. Αντίθετα, για πολυμερή μεγάλου M.B έχουμε μεγάλη αντίσταση σε εφελκυσμό. Ένας λόγος είναι η μεγάλη περιπλοκή των μακρομοριακών αλυσίδων μεταξύ τους(λόγω του μεγάλου μήκους τους). Ο δεύτερος λόγος είναι η ύπαρξη περισσότερων ομοιοπολικών δεσμών και διαμοριακών δυνάμεων(έλξεων) μεταξύ μακρομοριακών αλυσίδων μεγάλου μήκους. Αυτή η αναλογία M.B και μηχανικής αντοχής σε εφελκυσμό δεν συνεχίζεται επ'άοριστο καθώς φτάνει σε ένα ανώτατο όριο. Αν η ανώτατη τιμή του M.B ξεπεραστεί, θα προκύψουν προβλήματα στην επεξεργασία και μορφοποίηση του υλικού σε καλούπια λόγω μιας υπερβολικής αύξησης του ιξώδους του. Αυτό το ανώτατο όριο M.B δεν είναι το ίδιο για όλα τα πολυμερή καθώς εξαρτάται από τις ιδιότητες και τη δομή του.

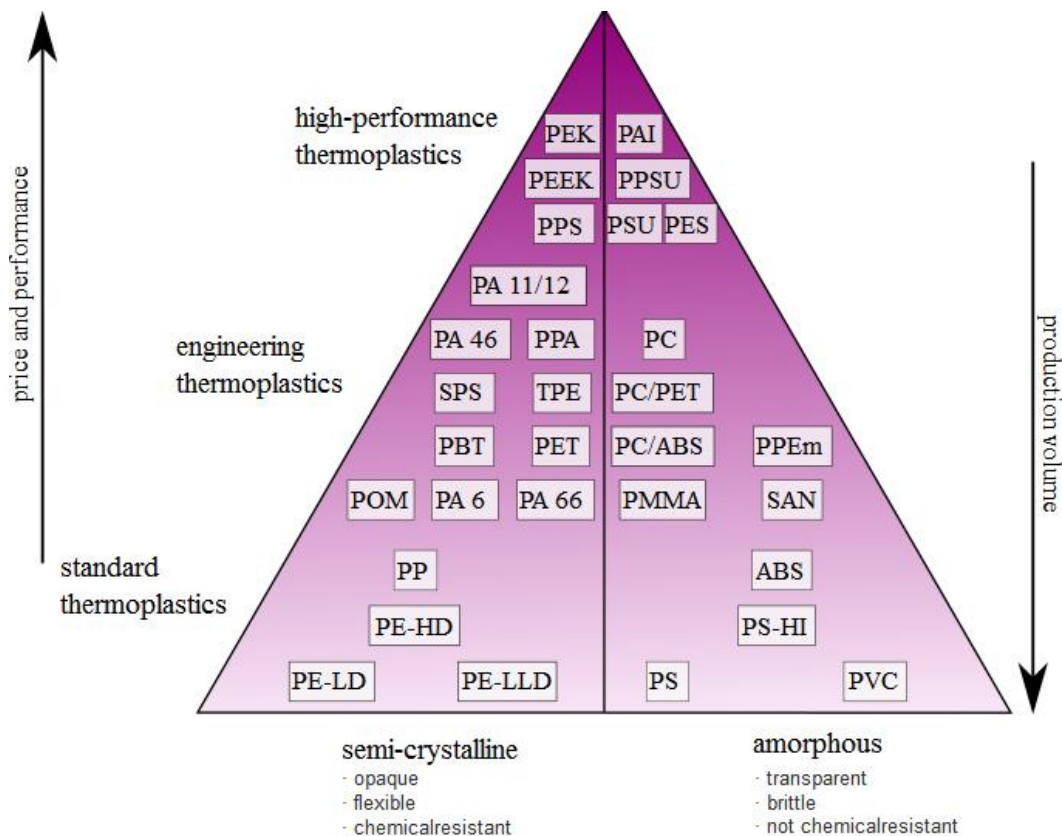
4. **Διαμοριακές δυνάμεις.** Όπως αναφέρθηκε στην ανάλογη ενότητα, οι διαμοριακές δυνάμεις είναι σημαντικές για τη συνοχή του πολυμερούς. Όσο μεγαλύτερες είναι στο σύνολο τους, τόσο πιο στιβαρό θα είναι το αποτέλεσμα. Από τη στιγμή που οι δεσμοί υδρογόνου είναι οι ισχυρότεροι των διαμοριακών δεσμών, το ποσοστό τους στη μάζα του υλικού δείχνει και την ισχύ των διαμοριακών δεσμών στο σύνολο τους.

2.1.9 Σημαντικά θερμοπλαστικά

Στον πίνακα 1.1 καταγράφονται τα βασικά βιομηχανικά πλαστικά, φυσικές ιδιότητες και η βασική χημική τους ομάδα(μονομερές). Στον πίνακα επίσης υπάρχουν θερμοπλαστικά υψηλής απόδοσης όπως PEEK(Poly-Ether-Ether-Ketone), PEI(Poly-Ether-Imide) και PC(Poly-CarboNyte) τα οποία χρησιμοποιούνται σε προηγμένες εφαρμογές, με ανάγκη σε υψηλή αντοχή σε κρούση ακόμα και σε υψηλές θερμοκρασίες.

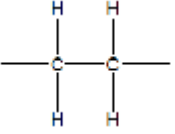
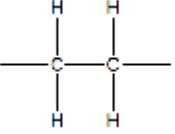
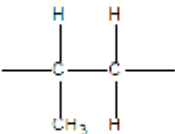
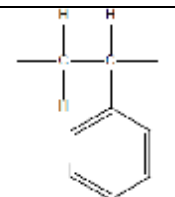
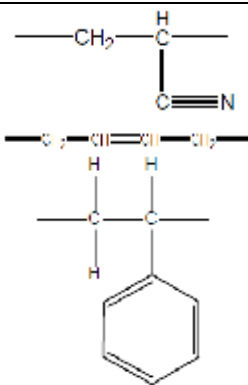
Το σχήμα 1.6 παρουσιάζει διάφορα θερμοπλαστικά σε μία πυραμίδα χωρισμένη σε δύο τμήματα(ημικρυσταλλικά, άμορφα). Όσο πιο κοντά στη βάση της πυραμίδας βρίσκεται το πλαστικό τόσο μεγαλύτερο όγκο παραγωγής έχει στη βιομηχανία. Αντίστροφα, όσο υψηλότερα στη πυραμίδα είναι το υλικό, τόσο ακριβότερο και υψηλότερης επίδοσης είναι.

Τέλος, ο πίνακας 1.2 περιέχει τις μέσες τιμές των πλαστικών του πίνακα 1.1 για παρθένο και ανακυκλωμένο πλαστικό, ως έχουν στις 18/5/15.

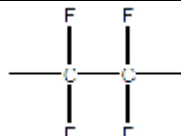
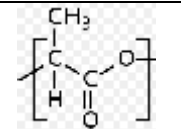



Εικόνα 2.7: Κατανομή θερμοπλαστικών σε σχέση με τον όγκο παραγωγής, την τιμή, τις ιδιότητες και το είδος του θερμοπλαστικού


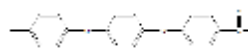
Πίνακας 2.1: Σημαντικά θερμοπλαστικά και ιδιότητες τους[15]

ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ			ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ		ΠΥΚΝΟ- ΤΗΤΑ [kg/m ³]	ΒΑΡΟΣ ΜΟΝΟ- ΜΕΡΟΥΣ [g/mol]	ΔΟΜΗ ΜΟΝΟΜΕΡΟΥΣ
ΟΜΑΔΑ	ΟΝΟΜΑ	ΣΥΝΤΟΜΟ -ΓΡΑΦΙΑ	T _g [°C]	T _m [°C]			
Πολυολε- φίνες	Πολυαιθυλένιο , χαμηλή πυκνότητα	LDPE	-90	120	910	28.1	
	Πολυαιθυλένιο , υψηλή πυκνότητα	HDPE	-30	135	941	28.1	
	Πολυπροπυλένιο	PP	-20	165	946	42.1	
Στυρενικές	Πολυστυρένιο	PS	100	Άμορφο*	960- 1040	104.1	
	Ακρυλονιτρίλιο/βουτα- διένιο/στυρένιο	ABS	100	Άμορφο*	1060- 1080	211.3	

Πίνακας 2.1: Σημαντικά θερμοπλαστικά και ιδιότητες τους[15]

ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ			ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ		ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ [kg/m ³]	ΒΑΡΟΣ ΜΟΝΟΜΕΡΟΥΣ [g/mol]	ΔΟΜΗ ΜΟΝΟΜΕΡΟΥΣ
ΟΜΑΔΑ	ΟΝΟΜΑ	ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ	T _g [°C]	T _m [°C]			
Βινύλια	Πολυβινυλοχλωρίδιο	PVC	85	Άμορφο*	1100-1450	62.5	
Φθοροπολυμερή	Πολυτετραφθοροαιθυλένιο(Τεφλόν)	PTFE	27	325	2200	100	
Πολυεστέρες	Πολυαιθυλένιο τereφθαλικό	PET	80	250	1455	192.2	
	Πολυβουτυλένιο τereφθαλικό	PBT	65	235	1310	220.2	
	Πολυλακτίδιο (βιοπλαστικό)	PLA	60	160	1210-1430	72-82	
Πολυαμίδια	Νάilon τύπου 6	N6	60	220	1084	113.2	
	Νάilon τύπου 12	N12	-	180	1010	197	
Πολυιμίδια	Πολυαιθεριμίδιο	PEI	215	Άμορφο*	1270	592.6	

Πίνακας 2.1: Σημαντικά θερμοπλαστικά και ιδιότητες τους

ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ			ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ		ΠΥΚΝΟ- ΤΗΤΑ [kg/m ³]	ΒΑΡΟΣ ΜΟΝΟ- ΜΕΡΟΥΣ [g/mol]	ΔΟΜΗ ΜΟΝΟΜΕΡΟΥΣ
ΟΜΑΔΑ	ΟΝΟΜΑ	ΣΥΝΤΟΜΟ- ΓΡΑΦΙΑ	T _g [°C]	T _m [°C]			
Πολυαιθέρες	Πολυκαρβονικό	PC	150	Άμορφο*	1200-1220	254.3	
	Πολυαιθεροαιθερο- κετόνη	PEEK	145	335	1320	288.3	

*Η θερμοκρασία τήξης είναι χαρακτηριστικό της κρυσταλλικής δομής

ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ	ΤΙΜΗ* [€/kg]	
	παρθένο	ανακυκλωμένο
LDPE	2,01	0,55
HDPE	1,96	1,17
PP	1,86	1,33
PS	2,44	1,66
ABS	2,44	1,37
PVC	2,15	0,98
PET	1,72	1,17
PBT	2,84	-
PLA	2,64	-
N6	3,09	-
PEI	14,28	-
PC	4,40	1,76
PEEK	88,00	-

* Οι μέσες τιμές πλαστικών όπως έχουν στις 18/5/15

Πίνακας 2.2: Μέσες τιμές για παρθένο και ανακυκλωμένο θερμοπλαστικό

2.2 ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΘΕΜΑΤΑ ΡΕΟΛΟΓΙΑΣ

2.2.1 Ιξώδες

Για να είναι επιτυχής η κατεργασία μορφοποίησης(δηλαδή και η εξώθηση) ενός πολυμερούς πρέπει προηγουμένως αυτό να ρευστοποιηθεί ώστε στη συνέχεια να ακολουθήσει η επεξεργασία του.

Αυτή η ρευστοποίηση προφανώς επέρχεται με τη προσφορά θερμότητας στο υλικό. Το στοιχείο το οποίο εμποδίζει την επίτευξη της ρευστοποίησης του πολυμερούς είναι μια χαρακτηριστική ιδιότητα του που ονομάζεται ιξώδες(μ).

Ιξώδες ενός πολυμερούς ονομάζεται η ιδιότητα, η αριθμητική τιμή της οποίας εκφράζει τον βαθμό των δυνάμεων τριβής μεταξύ των μακρομοριακών αλυσίδων του πολυμερούς. Το ιξώδες εκφράζεται σε μονάδες Pa·s (SI). Οι βασικοί παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται είναι το μοριακό βάρος(M.B), η θερμοκρασία και οι διαμοριακές δυνάμεις του πολυμερούς. Η σχέση του M.B με το ιξώδες είναι ευθέως ανάλογη καθώς όσο αυξάνεται το πρώτο, αυξάνεται και το δεύτερο. Αυτό οφείλεται στο ότι η αύξηση στο M.B σημαίνει κατά μέσο όρο μεγαλύτερες μακρομοριακές αλυσίδες, που με τη σειρά του σημαίνει μεγαλύτερο μπλέξιμο αυτών και αύξηση των δυνάμεων τριβής.

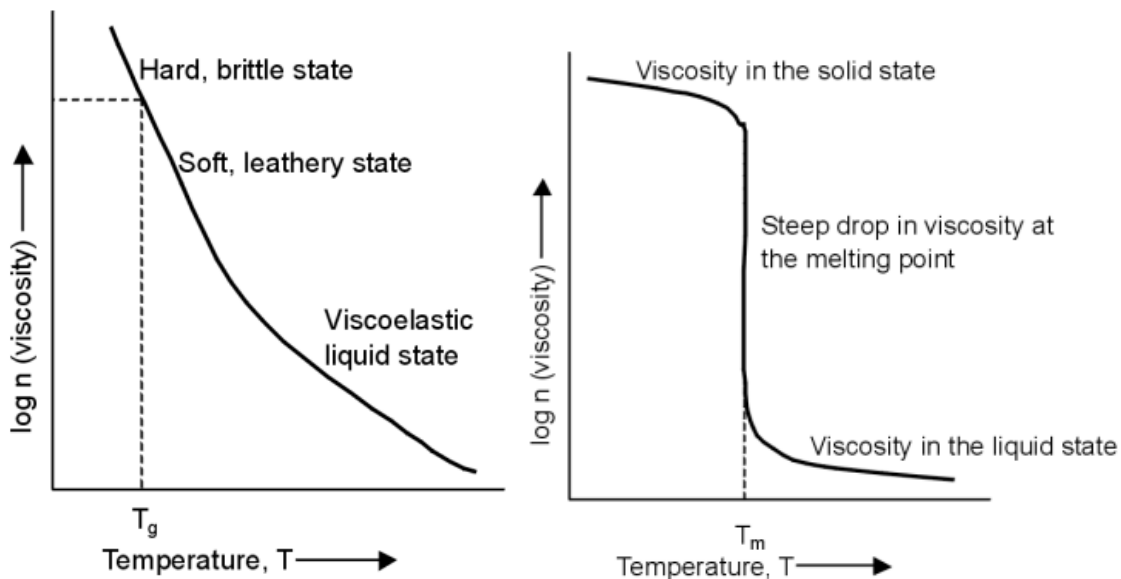
Η θερμοκρασία έχει αντιστρόφως ανάλογη σχέση με το ιξώδες καθώς όσο αυξάνεται, το ιξώδες μειώνεται και αντίστροφα. Αν φανταστεί κανείς το πολυμερές σαν ένα δωμάτιο το οποίο είναι γεμάτο φίδια(μακρομοριακές αλυσίδες) είναι εύκολο να κατανοήσει το ιξώδες. Όταν η θερμοκρασία είναι χαμηλή, τα φίδια δυσκολεύονται να ολισθήσουν το ένα με το άλλο και έτσι υπάρχει μικρή κινητικότητα στο δωμάτιο. Όταν όμως η θερμοκρασία αυξάνεται, τα φίδια μπορούν να γλιστρούν μεταξύ τους και έτσι αυξάνεται η κινητικότητά τους στο δωμάτιο. Το αποτέλεσμα αυτής της κινητικότητας είναι η ρευστοποίηση του υλικού.

Το πόσο εύκολα ή δύσκολα όμως θα επιτευχθεί αυτή η ολίσθηση των φιδιών μεταξύ τους μας φέρνει στο τρίτο παράγοντα που είναι οι διαμοριακές δυνάμεις. Αυτές είναι οι δυνάμεις που κρατούν τα μακρομόρια κοντά το ένα στο άλλο, δηλαδή στο συγκεκριμένο παράδειγμα, παριστάνονται από την τριβή που έχει το σώμα του ενός φιδιού με το άλλο. Εάν τα οι τριβές μεταξύ τους είναι ισχυρές, γίνεται δυσκολότερη η κίνηση τους. Έτσι καταλαβαίνει κανείς, πως αν υπάρχουν ισχυρές διαμοριακές δυνάμεις στο πολυμερές, το ιξώδες αυξάνεται.

Η συμπεριφορά των άμορφων και κρυσταλλικών πολυμερών κατά τη παροχή θερμότητας είναι αρκετά διαφορετική. Σε στερεή κατάσταση, ένα κρυσταλλικό πολυμερές είναι άκαμπτο με υψηλό ιξώδες. Όσο αυτό θερμαίνεται πέραν της θερμοκρασίας τήξης το ιξώδες πέφτει απότομα σε αυτό ενός υγρού που ρέει. Η κατάσταση είναι παρόμοια με του πάγου που γίνεται νερό. Ένα άμορφο πολυμερές σε στερεά κατάσταση είναι σκληρό και ψαθυρό. Υπό την παροχή θερμότητας το πολυμερές θα μεταμορφωθεί πρώτα σε ένα μαλακό τραχύ υλικό πριν διαμορφωθεί σε ένα παχύρευστο υγρό.

Η μεταβολή από στερεό σε μαλακό και τραχύ συμβαίνει στη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης του πολυμερούς. Ωστόσο, δεν υπάρχει απότομη μεταβολή

στο ιξώδες σε αυτή τη θερμοκρασία. Όλα τα πολυμερή με κάποιο επίπεδο άμορφης μάζας παρουσιάζουν θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης.



Εικόνα 2.8: Μεταβολή ιξώδους συναρτήσει της θερμοκρασίας για κρυσταλλικό(δεξιά) και άμορφο(αριστερά) πολυμερές

Το ιξώδες των θερμοπλαστικών κατά τη διάρκεια της εξώθησης μπορεί να κινηθεί σε εύρος από 10² [Pa·s] μέχρι 10⁵ [Pa·s]. Αυτή η μεταβολή οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη διατμητική ροή και στην ανάπτυξη διατμητικών τάσεων στη μάζα της ρητίνης. Ως αναφορά να σημειωθεί πως το ιξώδες του νερού είναι περίπου 10⁻³ [Pa·s], του μελιού 1,76 [Pa·s] και του λαδιού SAE 70 17,64 [Pa·s].

2.2.2 Διατμητικές τάσεις και ρυθμός διάτμησης

Κατά τη ροή ενός πολυμερούς σε μια κυκλική διατομή, αναπτύσσονται διατμητικές τάσεις μεταξύ στρωμάτων στο εσωτερικό του. Αυτές οι διατμητικές τάσεις είναι το αποτέλεσμα της δύναμης που ωθεί τη ρητίνη να ρέει και της αντίδρασης της τριβής μεταξύ των στρωμάτων του υλικού. Τα στρώματα παριστάνουν ομάδες μακρομοριακών αλυσίδων που το ένα προσπαθεί να κυλίσει πάνω στο άλλο.

Όπως είναι γνωστό από τη ρευστομηχανική, η ροή μέσα σε αγωγό(σωλήνα) δημιουργεί ένα χαρακτηριστικό παραβολικό προφίλ. Σε αυτή τη ροή, το ρευστό δεν έχει την ίδια ταχύτητα κατά ύψος του προφίλ. Στο κέντρο της διατομής η ταχύτητα είναι μέγιστη ενώ στα τοιχώματα του αγωγού είναι μηδενική.

Η διατμητική τάση δίνεται από τον τύπο:

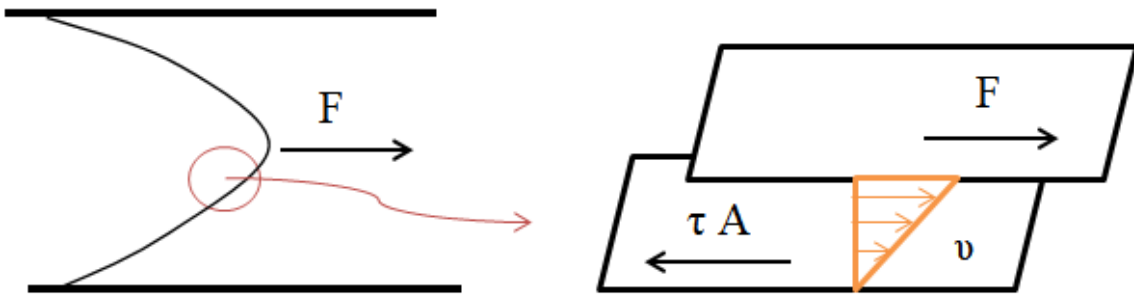
$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad [4] \quad (2.2)$$

Όπου μ το δυναμικό ιξώδες και η μερική παράγωγος ονομάζεται ρυθμός διάτμησης :

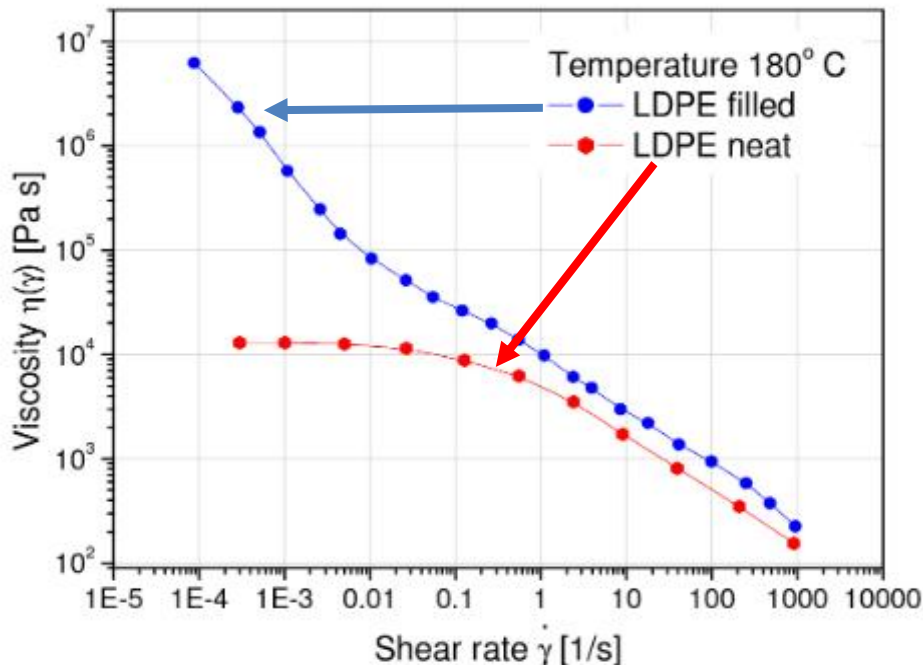
$$\dot{\gamma} = \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.3)$$

Η ιδιαιτερότητα των πολυμερικών ρητινών όσο αναφορά τη ροή τους, είναι ότι αυτή ευνοείται από την αύξηση των διατμητικών τάσεων, δηλαδή την αύξηση της πίεσης που τους ασκείται για να ρέυσουν και το ιξώδες τους μειώνεται ακόμα και στην ίδια θερμοκρασία. Κατά την εξώθηση, ο ρυθμός διάτμησης συνήθως κυμαίνεται από 100 μέχρι 1000 s⁻¹. [13]

Αυτή η ιδιαίτερη συμπεριφορά είναι κομμάτι της φύσης των πολυμερών καθώς αυτά συμπεριφέρονται σαν μη νευτώνεια ρευστά.



Εικόνα 2.9: Ροή σε κυλινδρικό αγωγό και ανάπτυξη διατμητικών τάσεων μεταξύ στρωμάτων του πολυμερούς [13]



Εικόνα 2.10: Μεταβολή ιξώδους καθαρού και γεμισμένου πολυαιθυλενίου στους 180 °C συναρτήσει του ρυθμού διάτμησης

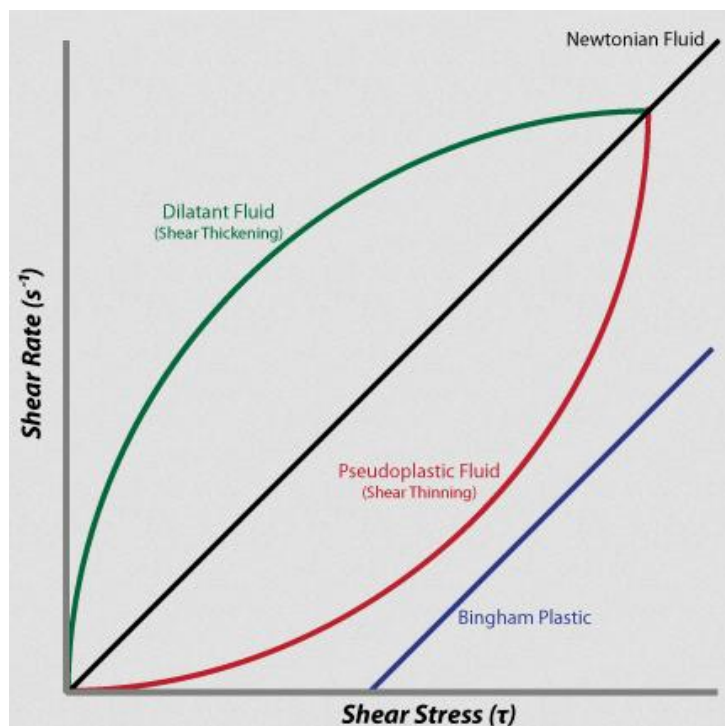
2.2.3 Ρεολογική συμπεριφορά

Όπως αναφέρθηκε οι πολυμερικές ρητίνες δεν συμπεριφέρονται σαν νευτώνεια ρευστά. Αυτό συμβαίνει διότι είναι συμπιεστά και τα χαρακτηρίζει η ιδιότητα της βισκοελαστικότητας που θα αναφερθεί στην επόμενη ενότητα.

Νευτώνιο ρευστό είναι αυτό του οποίου οι ιξώδεις τριβές που δημιουργούνται από τη ροή του είναι γραμμικά ανάλογες με το ρυθμό διάτμησης και ρυθμό παραμόρφωσης του.(deformation rate). Σαν αποτέλεσμα, το ιξώδες των υγρών αυτών δεν μεταβάλλεται με τη μεταβολή του ρυθμού διάτμησης και μένει σταθερό. Οι πολυμερικές ρητίνες όμως είναι μη νευτώνεια υγρά, και συγκεκριμένα shear thinning, που πρακτικά σημαίνει πως όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα που τα επεξεργαζόμαστε τόσο μεγαλύτερες είναι οι διατμητικές τάσεις στο εσωτερικό τους και κατ' επέκταση μειώνεται το ιξώδες τους(κατά την ίδια θερμοκρασία). Αυτή η ρεολογική συμπεριφορά συνοψίζεται από δύο γραφικές παραστάσεις. Η πρώτη είναι συνάρτηση ιξώδους-ρυθμού διάτμησης και η δεύτερη ρυθμού διάτμησης-διατμητικής τάσης.



Εικόνα 2.11: Μεταβολή του ιξώδους για νευτώνιο και μη νευτώνιο (ψευδοπλαστικό) ρευστό συναρτήσει του ρυθμού διάτμησης[13]



Εικόνα 2.12: Σχέση ρυθμού διάτμησης με διατμητικές τάσεις για όλα τα βασικά ρεολογικά μοντέλα

2.2.4 Βισκοελαστικότητα

Βισκοελαστικότητα είναι η ιδιότητα των πλαστικών που εκτίθενται σε ιξώδη και ελαστικά φαινόμενα κατά την παραμόρφωση τους. Οι διατμητικές τάσεις που αναπτύσσονται στο εσωτερικό (διαμοριακά) του υλικού, που είναι αποτέλεσμα διάχυσης άμορφης μάζας είναι το φαινόμενο που ονομάζεται «φαινόμενο της ιξώδους ροής».

Η δυνατότητα αποσυσπείρωσης των μακρομοριακών αλυσίδων με την εφαρμογή εφελκυστικής δύναμης και η μετέπειτα επανασυσπείρωση τους με την αφαίρεση της αποτελούν το «ελαστικό φαινόμενο» των θερμοπλαστικών και ελαστομερών πολυμερών. Σαν αποτέλεσμα των φαινομένων αυτών όταν μια μακρομοριακή αλυσίδα αποσυσπειρώνεται δεν είναι σίγουρο πως θα επανέλθει ξανά στην ίδια θέση κατά τη συσπείρωση της, με αποτέλεσμα να μεταβάλλει τη μικροδομή του υλικού. Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη βισκοελαστική συμπεριφορά είναι ο χρόνος άσκησης του εξωτερικού φορτίου στο υλικό και η θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται. Όσο μεγαλύτερη είναι η διάρκεια άσκησης του φορτίου και η θερμοκρασία του, τόσο μεγαλύτερες είναι οι πιθανότητες επίδρασης του βισκοελαστικού φαινομένου στη μικροδομή του πολυμερούς.

2.2.5 Θερμοκρασίες επεξεργασίας θερμοπλαστικών

Κατά την επεξεργασία και μορφοποίηση τους τα θερμοπλαστικά πολυμερή πρέπει να βρίσκονται σε θερμοκρασίες τήξης κατά τις οποίες μπορούν χρησιμοποιηθούν σαν υγρά. Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία τους, τόσο χαμηλότερο ιξώδες έχουν και μπορούν εύκολα να μορφοποιηθούν. Ωστόσο, δεν απαιτείται πάντα πολύ χαμηλό ιξώδες διότι η διαδικασία μορφοποίησης δεν είναι συνεχώς η ίδια. Για παράδειγμα, δεν απαιτείται το ίδιο ιξώδες κατά την χύτευση σε καλούπια (injection molding) και την εμφύσηση για την παραγωγή φιλμ.

Επιπροσθέτως, το κάθε πλαστικό έχει μια χαρακτηριστική μέγιστη θερμοκρασία κατά την οποία μπορεί να φτάσει η μάζα του και να διατηρεί τις ιδιότητες του. Αυτή ονομάζεται θερμοκρασία αποσύνθεσης και φυσικά διαφέρει από υλικό σε υλικό αναλόγως τη μικροδομή του και τους χημικούς δεσμούς που το συγκροτούν. Η αποσύνθεση οδηγεί σε σπάσιμο των μακρομοριακών αλυσίδων, μείωση του βαθμού πολυμερισμού και υποβάθμιση των μηχανικών, φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του υλικού. Για τους δύο παραπάνω λόγους και ανάλογα το θερμοπλαστικό, δημιουργείται ένα εύρος θερμοκρασιών στις οποίες έχει τη δυνατότητα, αλλά και επιτρέπεται να μορφοποιηθεί.

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρατίθενται τα εύροι θερμοκρασίας επεξεργασίας-μορφοποίησης για δεκαπέντε σημαντικά θερμοπλαστικά. Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστεί ότι οι εν λόγω θερμοκρασίες είναι αυτές που οδηγείται η ίδια η μάζα της ρητίνης και όχι η θερμοκρασία του εξωθητή. Ο εξωθητής ρυθμίζεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες ώστε να παρέχει τα κατάλληλα ποσά θερμότητας στο πλαστικό, το οποίο απορροφά τη θερμότητα αυτή και οδηγεί το σύστημα σε θερμική ισορροπία.

Πίνακας 2.3: Σημαντικές θερμοκρασίες βασικών θερμοπλαστικών

ΠΟΛΥΜΕΡΕΣ		ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ		ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΕΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	
ΟΝΟΜΑ	ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ	T _g [°C]	T _m [°C]	ΑΠΟ [°C]	ΜΕΧΡΙ* [°C]
Πολυαιθυλένιο , χαμηλή πυκνότητα	LDPE	-90	120	149	316
Πολυαιθυλένιο , υψηλή πυκνότητα	HDPE	-30	135	177	274
Πολυπροπυλένιο	PP	-20	165	191	288
Πολυστυρένιο	PS	100	Άμορφο	149	260
Ακρυλονιτρίλιο/βουταδιένιο/στυρένιο	ABS	100	Άμορφο	163	274
Πολυβινυλοχλωρίδιο	PVC	85	Άμορφο	141	213
Πολυτετραφθοροαιθυλένιο(Τεφλόν)	PTFE	27	325	316	349
Πολυαιθυλένιο τereφθαλικό	PET	80	250	227	349
Πολυβουτυλένιο τereφθαλικό	PBT	65	235	224	274
Πολυλακτίδιο (βιοπλαστικό)	PLA	60	160	-	-
Νάιλον τύπου 6	N6	60	220	227	288
Νάιλον τύπου 12	N12	-	180	179	274
Πολυαιθεριμίδιο	PEI	215	Άμορφο	338	371
Πολυκαρβονικό	PC	150	Άμορφο	271	293
Πολυαιθεροαιθεροκετόνη	PEEK	145	335	316	399

* η επεξεργασία σε μεγαλύτερη θερμοκρασία αποφέρει χημική αποσύνθεση (αλλοίωση) ή/και άλλα ανεπιθύμητα αποτελέσματα

3 ΕΞΩΘΗΤΗΣ ΜΕ ΠΕΡΙΣΤΡΕΦΟΜΕΝΟ ΚΟΧΛΙΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στην εξώθηση, η πρώτη ύλη είναι συνήθως κόκκοι θερμοπλαστικού πολυμερούς και διοχετεύεται μέσω ενός κώνου (χοάνη) στο εσωτερικό της συσκευής. Πρόσθετα όπως χρωστικά και αναστολείς υπεριώδους ακτινοβολίας συχνά προστίθενται μαζί με την πρώτη ύλη στον εξωθητή.

Εκεί βρίσκεται ένας περιστρεφόμενος κοχλίας, ο οποίος σπρώχνει και συμπιέζει τους θερμοπλαστικούς κόκκους και λόγω της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται από την τριβή λόγω ιξώδους ροής των κόκκων και από εξωτερικά θερμαντικά στοιχεία, επιτυγχάνεται η ομογενοποίηση του θερμοπλαστικού. Στην πορεία του το πολυμερές μέσα στον θάλαμο του κοχλίου περνά επίσης και από φίλτρα με σκοπό να απομακρύνονται ξένα σωματίδια ή μη λειωμένα κομμάτια πλαστικού. Ύστερα το υλικό εξέρχεται από κατάλληλο ακροφύσιο και είτε διοχετεύεται σε καλούπι στο οποίο και ψύχεται ή περνά σε κάποια άλλη διαδικασία μορφοποίησης όπου ψύχεται επίσης. Η ψύξη γίνεται ώστε το υλικό να αποκτήσει την τελική του μορφή και επιβάλλεται να βρεθεί σε θερμοκρασία μικρότερη της υαλώδους μετάπτωσης (T_g) γι' αυτό το σκοπό. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με την ύπαρξη νερού είτε με αυτή του ψυχρού αέρα.

Να σημειωθεί πως στη περίπτωση των εξωθητών με περιστρεφόμενο κοχλία, χρησιμοποιούνται επίσης και μηχανές με διπλή κοχλίωση για καλύτερη ομογενοποίηση σε μικρότερες θερμοκρασίες και μικρότερη αντιροή υλικού. Η βασική χρήση των εξωθητών αυτών είναι η μίξη πολυμερών για την παραγωγή συμπολυμερικών προϊόντων.

3.2 ΖΩΝΕΣ ΕΞΩΘΗΣΗΣ

Η εξώθηση που λαμβάνει χώρα στο εσωτερικό της συσκευής αναλύεται σε τρεις κύριες ζώνες/στάδια και μαζί, καθορίζουν το θερμοκρασιακό προφίλ του θαλάμου του εξωθητή (Barrel Temperature Profile) και φαίνονται στο σχήμα 3.1:

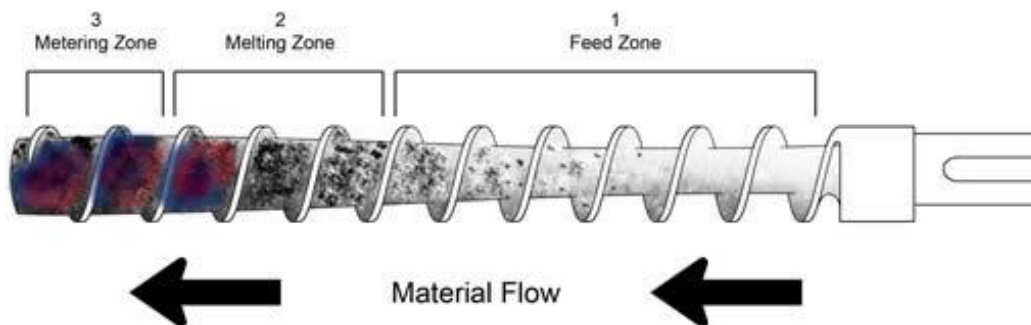
1. Ζώνη τροφοδοσίας (feed zone)
2. Ζώνη τήξης (melting zone)
3. Ζώνη μεταφοράς τήγματος (metering zone)

Αναλυτικά για κάθε ζώνη:

1. Όπως προαναφέρθηκε, αρχικά οι κόκκοι πλαστικού τροφοδοτούνται μέσω μιας χοάνης στο θάλαμο του εξωθητή. Εκεί έρχονται σε επαφή με τον περιστρεφόμενο κοχλία και ωθούνται προς την επόμενη ζώνη.
2. Σε αυτό το τμήμα λαμβάνει χώρα η τήξη του θερμοπλαστικού. Κατάλληλα προσαρμοσμένα θερμαντικά στοιχεία σε συνδυασμό με τη συμπίεση και με την τριβή που αναπτύσσεται στο εσωτερικό των τοιχωμάτων λιώνουν το πλαστικό. Η θερμοκρασία που επικρατεί στο θάλαμο είναι μια από τις σημαντικότερες παραμέτρους εξώθησης και φυσικά διαφέρει ανάλογα με το πλαστικό που χρησιμοποιείται, το προϊόν που θα παραχθεί αλλά και άλλους

λόγους που θα αναλυθούν σε επόμενο κεφάλαιο. Δίοδοι εξαερισμού μπορεί να βρίσκονται σε αυτή τη ζώνη με σκοπό να αποδεσμευτεί εγκλωβισμένος αέρας ή υδρατμοί που προέρχονται από την ύπαρξη υγρασίας στο πλαστικό.

3. Στην τελευταία ζώνη γίνεται η ολοκλήρωση της τήξης του υλικού. Το τήγμα συμπιέζεται λόγω αύξησης της διαμέτρου του κοχλίου και το πλαστικό που βρίσκεται στο τοίχωμα του θαλάμου αναμιγνύεται με το υπόλοιπο. Ένα τυπικό εύρος πίεσης στη ζώνη αυτή είναι από 70 έως 480 bar. Η γεωμετρία της ζώνης μεταφοράς τήγματος καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα της εξώθησης. Φίλτρα για την αποφυγή εξώθησης μη λιωμένων μαζών πλαστικού τοποθετούνται επίσης στη ζώνη αυτή.



Εικόνα 3.1: Ζώνες κατά την διαδικασία εξώθησης απεικονιζόμενες πάνω σε κοχλία

3.3 Παράμετροι εξώθησης

Η εξώθηση θερμοπλαστικών είναι μια πολύπλοκη και πολλές φορές μη προβλέπιμη διαδικασία. Για παράδειγμα, το θερμοκρασιακό προφίλ ενός εξωθητή, είναι πολύ πιθανό να μην ισχύει για τον όμοιο του στο ίδιο περιβάλλον παραγωγής ακόμα και αν οι δύο εξωθητές επεξεργάζονται το ίδιο πλαστικό με τον ίδιο ρυθμό. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να γίνονται ορισμένες σειρές πειραμάτων με σκοπό την βελτιστοποίηση του προφίλ θερμοκρασίας (Barrel temperature Profile Optimization) για κάθε εξωθητή ξεχωριστά.

Οι σημαντικότερες παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπ' όψη είναι:

1. Κοχλίας(screw design) και λόγος μήκους/διαμέτρου (L/D ratio):

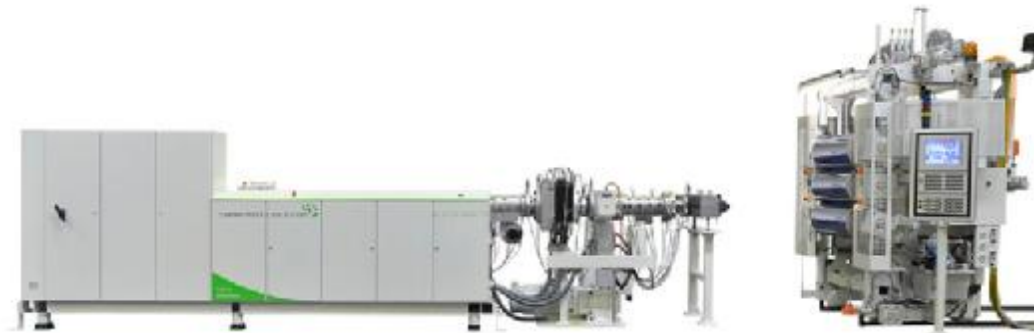
Ο κοχλίας είναι το εξάρτημα το οποίο όχι μόνο οδηγεί το υλικό προς το ακροφύσιο αλλά ασκεί και την κατάλληλη πίεση στο τήγμα για καλύτερο αποτέλεσμα. Η πίεση αυτή επιτυγχάνεται με δύο τρόπους, τη μείωση του βήματος του κοχλίου καθώς και την αύξηση της διαμέτρου του κορμού του. Οι περισσότεροι βιομηχανικοί εξωθητές δεν έχουν μόνο τις γνωστές μας τρεις ζώνες εξώθησης αλλά και κάποιες ενδιάμεσες ζώνες μεταξύ αυτών. Αυτό οφείλεται στο σχετικό μήκος του κοχλίου, δηλαδή το λόγο μήκους/ διαμέτρου του κοχλίου που καθορίζει σε μεγάλο βαθμό το θερμοκρασιακό προφίλ της κατασκευής. Μεγάλος λόγος σημαίνει μακρόστενος εξωθητής και δυνατότητα πιο ομοιόμορφης επεξεργασίας του πολυμερούς όπως και δυνατότητα ταχύτερης εξώθησης. Για τη βιομηχανία, εξωθητές λόγου L/D ίσο με 24-26:1 και μικρότερο θεωρούνται μικροί ενώ με λόγο 40:1 και άνω μεγάλοι.[7] Για παράδειγμα, ένας κοχλίας διαμέτρου 150 mm με λόγο L/D 24:1 αντιστοιχεί σε 3,6 m ενώ με λόγο 40:1 σε 6 m.



Εικόνα 3.2: Κοχλίας για εξώθηση PE και PVC

2. Ταχύτητα περιστροφής κοχλία σε στροφές/λεπτό (RPM speed):

Εδώ η κατάσταση είναι πιο προφανής καθώς μπορεί να καταλάβει κανείς πως, όσο γρηγορότερα στρέφεται ο κοχλίας, τόσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός εξώθησης. Επιπλέον, μεγάλος ρυθμός εξώθησης του υλικού σημαίνει και μικρότερος χρόνος αντίδρασης του υλικού στη θερμοκρασία αλλά αυξάνει τις διατμητικές τάσεις στο εσωτερικό της ρητίνης με αποτέλεσμα τη μείωση του ιξώδους της. Έτσι, απαιτείται η έβρεση του τέλειου συνδυασμού αυτών των δύο παραμέτρων. Ένας τυπικός εξωθητής λειτουργεί σε ταχύτητες της τάξης των 100 rpm ενώ την ίδια στιγμή όλο και μεγαλύτερη χρήση έχουν οι νεότεροι ταχύτεροι εξωθητές (high speed extruders) που ξεπερνούν τις 1500 rpm και φτάνουν περίπου μέχρι 2000 rpm! [9] Αυτές οι ταχύτητες οδηγούν σε παραγωγή άνω του ενός τόνου πλαστικού ανά ώρα.



Εικόνα 3.3: Εξωθητής υψηλής ταχύτητας από την battenfeld-cincinnati (Γερμανία, Αυστρία, Κίνα, ΗΠΑ).

3. Υλικό:

Άλλη μια προφανής παράμετρος είναι το υλικό το οποίο θα δεχτεί την επεξεργασία καθώς ορίζει τη μέγιστη θερμοκρασία του συστήματος αλλά και ολικό προφίλ της. Τυπικές θερμοκρασίες επεξεργασίας για ημικρυσταλλικά θερμοπλαστικά είναι περίπου 30 με 100 οC πάνω από τη θερμοκρασία τήξης τους. Για παράδειγμα, στο HDPE (υψηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο) το οποίο έχει θερμοκρασία τήξης περίπου 135 οC, χρησιμοποιούνται

θερμοκρασίες από 177 μέχρι 274°C. Ωστόσο, το θερμοκρασιακό εύρος επεξεργασίας ποικίλει ανάλογα με το πολυμερές. Αυτό διότι θερμοκρασίες πολύ κοντά στο σημείο τήξης μπορεί να μην αποφέρουν το επιθυμητό ιξώδες ενώ υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να προκαλέσουν αλλοίωση του υλικού. Για τα άμορφα πλαστικά συνήθως οι θερμοκρασίες φτάνουν τους 100 °C πάνω από τη θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T_g , glass transition point).[7] Ο παρακάτω πίνακας απεικονίζει κάποια τυπικά θερμοκρασιακά προφίλ για διάφορα βιομηχανικά πλαστικά σε πέντε διαφορετικά σημεία του εξωθητή.

Πίνακας 3.1: Τυπικά θερμοκρασιακά προφίλ για πολυμερή σε πέντε διαφορετικά σημεία του εξωθητή με φορά από την τροφοδοσία μέχρι το ακροφύσιο (τροφοδοσία, πίσω, μέσο, μπροστινό μέρος και ακροφύσιο)

TYPICAL BARREL TEMPERATURE SETTINGS

(approx.) Ascending profile

Polymer	Melt Temp	Feed Throat	Rear	Middle	Front	Nozzle	Polymer	Melt Temp	Feed Throat	Rear	Middle	Front	Nozzle
	C	C	C	C	C	C		C	C	C	C	C	C
ABS	220 260	35 40	150 180	180 230	210 280	222 280	PETP	260 280	60 80	240 250	245 255	250 260	250 260
CA	170 250	40	135 165	140 185	165 200	185 200	PS	220 270	20 30	150 200	180 230	210 260	220 280
POM	195 245	30 40	150 180	180 200	190 215	195 215	HDPE	220 280	20 30	160 230	200 260	220 280	210 270
PMMA	220 260	50 60	135 180	185 200	200 250	200 250	LDPE	180 280	20 30	120 200	180 260	200 280	210 270
PPO	250 290	40	190 240	230 270	250 290	240 275	PP	250 270	20 30	150 210	210 250	240 290	240 300
PA6/6	220 250	60 80	265	260	280	280	RPVC	170 190	30 40	135 160	165 180	180 205	180 210
PC	260 310	70 80	235 270	285 310	305 350	310 350	SPVC	180 200	40	125 150	150 175	160 200	150 200

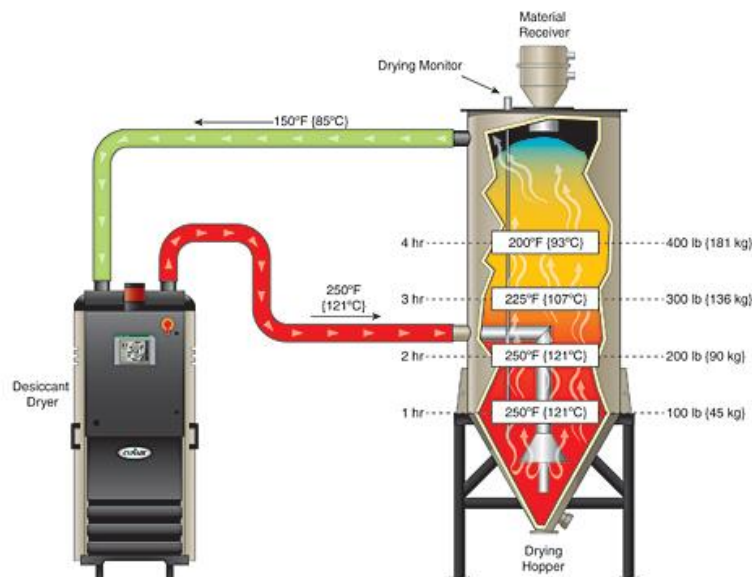
4. Εξοπλισμός:

Στον εξοπλισμό εντάσσονται οι συσκευές οι οποίες χρησιμοποιούνται όπως το σύστημα ψύξης του τήγματος, τα θερμαντικά στοιχεία/αντιστάσεις και θερμοζεύγη αλλά και η τοποθέτηση ή χρήση τους. Σημαντικό παράδειγμα είναι η τοποθέτηση των θερμοζευγών στη διάταξη. Μια καλή τοποθέτηση είναι δυνατή να δώσει σωστά συμπεράσματα για την επεξεργασία του υλικού ενώ, μια κακή τοποθέτηση μπορεί να αποφέρει λάθος συμπεράσματα έως και προβλήματα στην κατασκευή. Για να γίνει καλύτερα αντιληπτό, είναι σημαντικός παράγοντας σε τι βάθος εισέρχεται το θερμοζεύγος στο θάλαμο του εξωθητή με σκοπό να πάρει τη μέτρηση για το συγκεκριμένο σημείο της εκάστοτε ζώνης. Αν το θερμοζεύγος απλά αγγίζει την εξωτερική επιφάνεια του θαλάμου τότε όπως είναι φυσικό, δεν θα δείξει την ακριβή θερμοκρασία που επικρατεί σε αυτόν, χωρίς αυτό όμως να σημαίνει ότι δεν μπορεί να

υπολογιστεί. Έτσι φαίνεται πως η βελτιστοποίηση του κάθε εξωθητή και το προφίλ θερμοκρασίας του αφορά μόνο αυτόν. Ένας σημαντικός ακόμη παράγοντας, που φαίνεται σε βάθος χρόνου, και επηρεάζει τη διαδικασία είναι η φθορά του θαλάμου και του κοχλία.

5. Περιβάλλον:

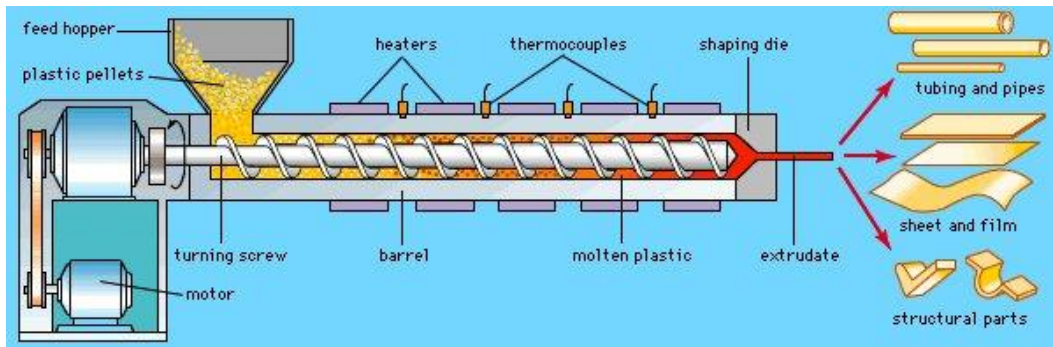
Στη κατηγορία αυτή εντάσσονται η θερμοκρασία του αέρα και η υγρασία του. Για τη θερμοκρασία όπως είναι φυσικό, αν είναι χαμηλή, αυξάνονται οι απώλειες θερμικής ενέργειας οι οποίες πρέπει να καλυφθούν. Όσο αναφορά την υγρασία όμως η κατάσταση δεν είναι το ίδιο απλή. Η ύπαρξη υπερβολικής υγρασίας στη πρώτη ύλη (π.χ κόκκους), μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στη διαδικασία της εξώθησης ή ακόμη και στο προϊόν που κατασκευάστηκε κατά τη διάρκεια χρήσης του.[2] Για να αποφευχθούν τέτοιες καταστάσεις, χρησιμοποιούνται ειδικές διατάξεις στις οποίες τοποθετείται η πρώτη ύλη και στεγνώνεται όσο πρέπει (Plastics dryers ή Resin dryers).



Εικόνα 3.4: Διάταξη στεγνωτηρίου πλαστικών κόκκων

6. Κατανάλωση ενέργειας:

Καθώς οι εταιρίες κατασκευής βελτιώνουν σε όλα τα επίπεδα τους εξωθητές τους (ταχύτητα, ευελιξία, ποιότητα), καθώς και η συνεχώς αυξανόμενη περιβαλλοντική συνείδηση του ανθρώπου, ο παράγοντας ενεργειακής απόδοσης αποκτά όλο και μεγαλύτερη αξία για τη βιομηχανία. Σε τελευταίες εκθέσεις παρουσιάζονται μηχανές με ενεργειακά αποδοτικότερη σχεδίαση κοχλία καθώς και χρήση σύγχρονων κινητήρων μόνιμου-μαγνήτη, ως αντικατάσταση των DC και AC, οι οποίοι δεν χρειάζονται μειωτήρα στροφών για αύξηση της ροπής του κοχλία.[8] Άλλες βελτιώσεις σχετίζονται με τη παραγωγικότητα των μηχανών όπως τη γρήγορη αλλαγή τρυπανιού (αναλόγως την επεξεργαζόμενη ρητίνη) και τη γρήγορη αλλαγή υλικού εξώθησης μέσω διαφορετικών δοχείων.



Εικόνα 3.5: Τυπική συσκευή εξώθησης σε τομή

3.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΞΩΘΗΣΗΣ

Αφού έγινε ανάλυση της αρχής λειτουργίας των εξωθητών ,σειρά έχουν οι διαδικασίες εξώθησης των θερμοπλαστικών ρητινών ,δηλαδή , το τελικό στάδιο παραγωγής του προϊόντος. Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο ,διαφορετικά προϊόντα μπορούν να παραχθούν μέσω των εξωθητών .Οι διαδικασίες εξώθησης λοιπόν ποικίλουν αναλόγως το αποτέλεσμα που ζητείται .Καταλυτικό ρόλο έχει το ακροφύσιο από το οποίο εξωθείται το πλαστικό καθώς αυτό του δίνει την επιθυμητή μορφή.

1. Διαδικασία παραγωγής κόκκων από νήμα (Strand pelletizer)

Το υλικό εξωθείται σε μορφή νήματος ,ψύχεται και κόβεται σε κόκκους μέσω κατάλληλου περιστρεφόμενου εργαλείου .Η διαδικασία αυτή έχει διάφορες παραλλαγές ,αναλυτικά :

- **Εμβύθιση νήματος σε νερό (Strand water bath)[3]**

Όταν το νήμα εξέλθει από το ακροφύσιο περνά από μια πισίνα νερού στην οποία ψύχεται και έπειτα οδηγείται στο σύστημα κοπής του σε κόκκους (Cold face cutter).



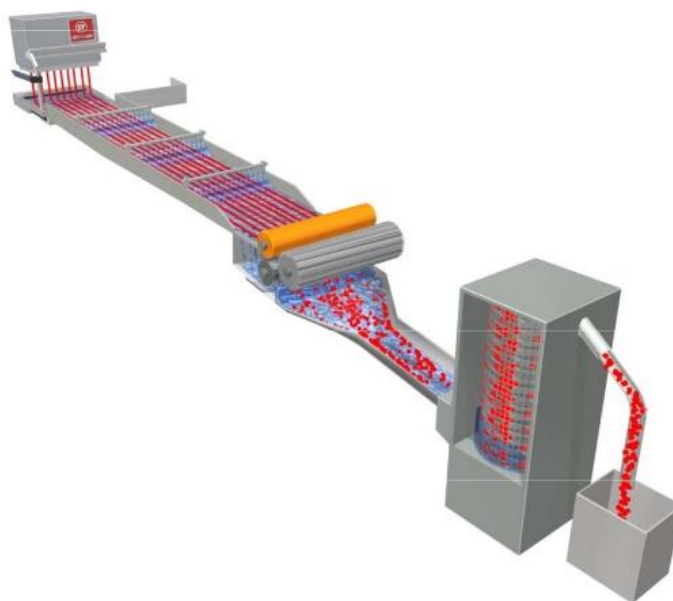
Εικόνα 3.6: Βύθιση νήματος σε νερό[3]

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Χαμηλό κόστος	Υψηλή φθορά κοπτικών
Απλό στη χρήση	Μικρή ευελιξία της διαδικασίας
Εύκολος καθαρισμός	
Χρήση σχεδόν όλων των θερμοπλαστικών	

· **Νήμα περασμένο από τσουλήθρα νερού (Strand water slide)**

Το νήμα όπως έχει από την έξοδο του οδηγείται σε μια τσουλήθρα η οποία σε σημεία της βρέχεται από νερό. Στη συνέχεια το νήμα κόβεται σε κόκκους.

Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Υψηλή αυτοματοποίηση	Υψηλό κόστος
Υψηλή παραγωγικότητα	Δύσκολη εγκατάσταση
Ευελιξία ψύξης	
Πιο συμπαγής μηχανισμός	

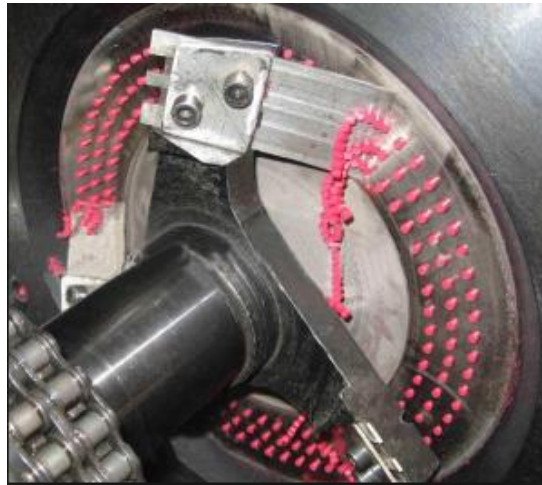


Εικόνα 3.7: Νήμα σε τσουλήθρα νερού[3]

· **Δημιουργία κόκκων μέσα σε νερό (Underwater pelletizer)**

Η περίπτωση αυτή διαφέρει αρκετά από τις προηγούμενες καθώς το ακροφύσιο μπορεί να έχει κι εδώ κυκλική μορφή αλλά το πολυμερές δεν προλαβαίνει να γίνει νήμα καθώς ένα κυκλικό κοπτικό εργαλείο περιστρέφεται και διαρκώς κόβει το υλικό σε κόκκους απευθείας από την έξοδο του τη στιγμή που είναι ακόμα ζεστό (Hot face cutter). Το υλικό ψύχεται στη μορφή κόκκων καθώς η διαδικασία λαμβάνει χώρα μέσα σε νερό.

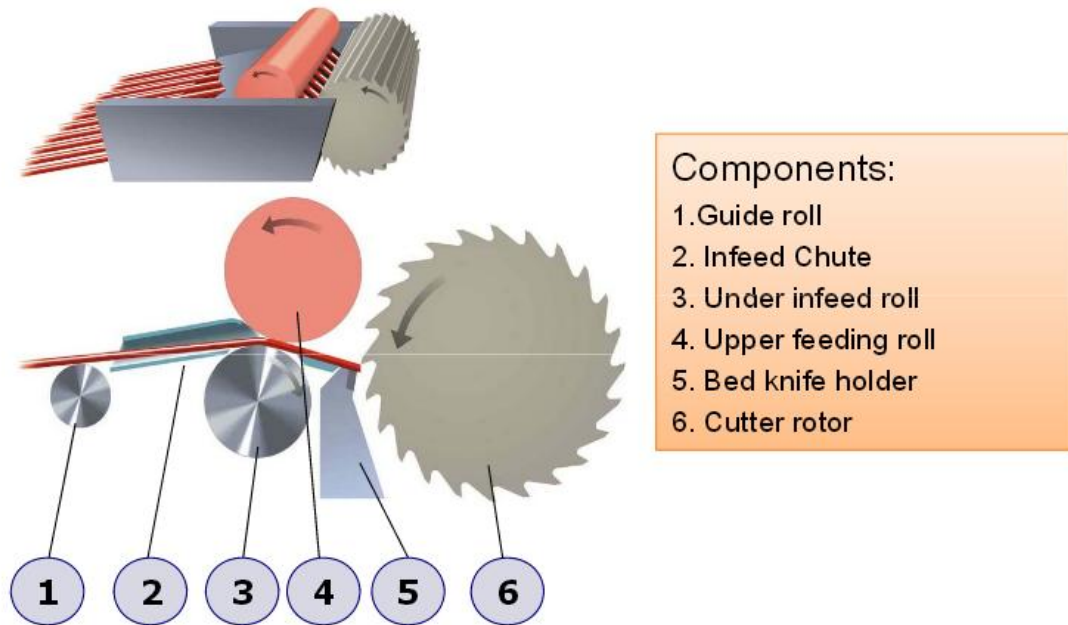
Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα
Υψηστή αυτοματοποίηση	Σχετικά μεγάλο κόστος συστήματος
Μεγάλη ζωή κοπτικών	Πολύπλοκα βοηθητικά συστήματα νερού και στεγνώματος υλικού
Μεγάλη παραγωγικότητα	Προβλήματα ψύξης ακροφυσίου σε υλικά υψηλής θερμοκρασίας τήξης



Εικόνα 3.8: Hot face cutter[3]



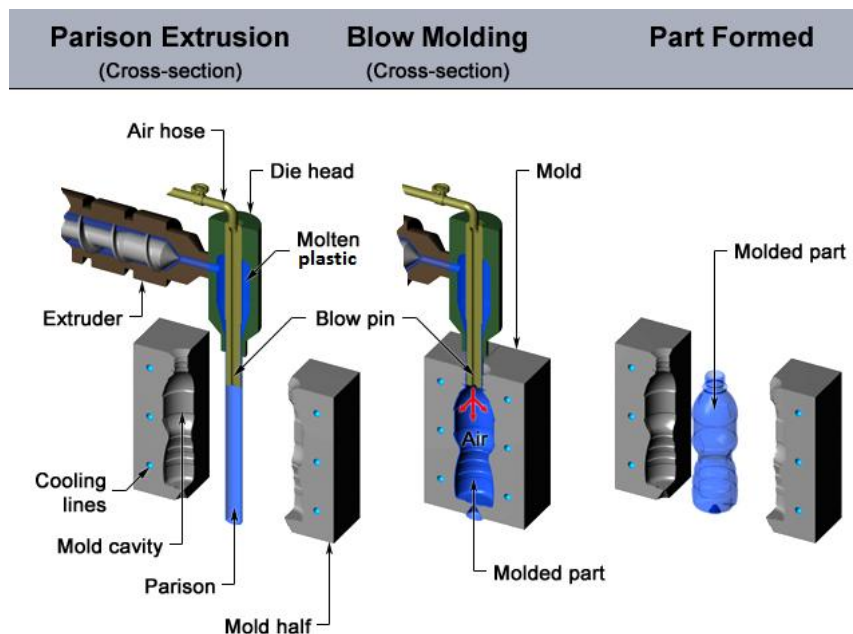
Εικόνα 3.9: Μηχάνημα παραγωγής κόκκων μέσα σε νερό[3]



Εικόνα 3.10: Σύστημα οδήγησης και κοπής νήματος σε κόκκους[3]

2. Εμφύσηση σε καλούπι (blow molding)

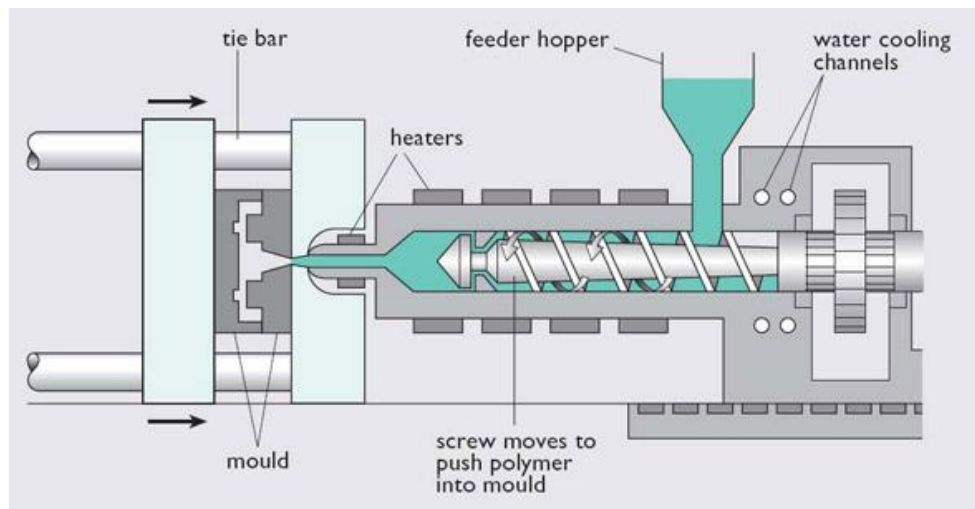
Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιείται για να σχηματίσει κοίλα αντικείμενα όπως μπουκάλια. Αρχικά, το πλαστικό εξωθείται από το ακροφύσιο και του δίνεται μια καθορισμένη μορφή που ονομάζεται μόρφωμα (parison). Το μόρφωμα έχει κυλινδρικό προφίλ έτσι ώστε στη συνέχεια, όταν εισέλθει στο κλειστό καλούπι, να γίνει η εμφύσηση αέρα και να σπρώξει το υλικό στα τοιχώματα του καλουπιού όπου και ψύχεται. Τέλος, το καλούπι ανοίγει και σειρά έχει ένας νέος κύκλος παραγωγής. [5]



Εικόνα 3.11: Εμφύσηση σε καλούπι (blow molding) για παραγωγή μπουκαλιού

3. Χύτευση σε καλούπι (Injection molding)

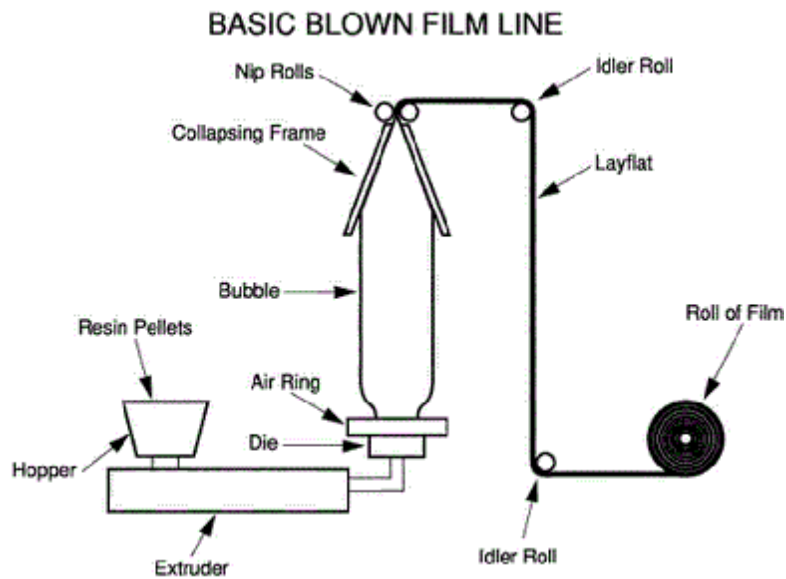
Είναι η διαδικασία κατά την οποία το λιωμένο πλαστικό καθώς εξέρχεται από το ακροφύσιο οδηγείται μέσα σε κλειστό καλούπι. Εκεί, παίρνει την επιθυμητή μορφή και ψύχεται για να ολοκληρωθεί η παραγωγή του. Η διάταξη αποτελείται από δύο τμήματα όπου στο πρώτο ανήκει το ένα κομμάτι του καλουπιού και στο δεύτερο το άλλο ώστε το ένα τμήμα να έχει τη δυνατότητα να κινείται. Με αυτό το τρόπο το καλούπι μπορεί να ανοίξει για να πέσει το προϊόν και επιπλέον επιφέρει μεγάλο βαθμό αυτοματοποίησης στη διαδικασία. Για τη μέθοδο αυτή συνιστώνται ρητίνες χαμηλής πυκνότητας ώστε να επιτυγχάνεται η καλύτερη ροή της στο καλούπι. [5]



Εικόνα 3.12: Βασική διάταξη χύτευσης σε καλούπι

4. Εμφύσηση για παραγωγή φιλμ (Blown film extrusion)

Κατά τη διαδικασία αυτή το πολυμερές εξωθείται μέσω ενός άλλου τύπου ακροφυσίου. Το εν λόγω ακροφύσιο είναι διαμορφωμένο με τέτοιο τρόπο ώστε, το υλικό να εξέρχεται σε κυλινδρική μορφή και, μέσω ενός ειδικά διαμορφωμένου δακτυλιδιού αέρα (air ring), να φυσά το εσωτερικό του κυλίνδρου με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας φούσκας με κατεύθυνση προς τα άνω. Έτσι το φιλμ ψύχεται και αποκτά το επιθυμητό πάχος. Στη συνέχεια, η φούσκα μαζεύεται από ειδικό πλαίσιο και πιέζεται από μηχανισμό διέλασης ώστε να πάρει την τελική του μορφή. Τέλος, διπλώνεται σε κουβαρίστρα και είναι έτοιμο για χρήση.



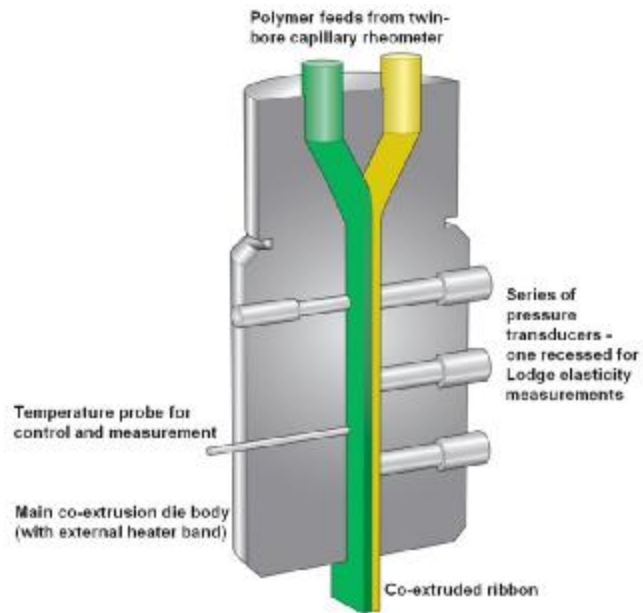
Εικόνα 3.13: Βασική διάταξη εμφύσησης για παραγωγή φιλμ



Εικόνα 3.14: Συνδεσμολογία ακροφυσίου και δακτυλιδιού αέρα για τη δημιουργία της φούσκας

5. Συν-εξώθηση(Co-extrusion)

Είναι η ταυτόχρονη εξώθηση πολλαπλών στρώσεων υλικών. Η διάταξη αποτελείται από δύο ή περισσότερους εξωθητές που λιώνουν και μεταφέρουν διαφορετικά πολυμερή σε ένα κοινό ακροφύσιο με σκοπό την παραγωγή πολυστρωματικών φιλμ, σωλήνων και φύλλων.



Εικόνα 3.15: Ένωση των δύο πολυμερών στο κοινό ακροφύσιο της συν-εξώθησης



Εικόνα 3.16: Διάταξη συν-εξώθησης για την παραγωγή πολυστρωματικού φιλμ

4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΕΞΩΘΗΤΗ ΜΙΚΡΩΝ ΔΙΑΣΤΑΣΕΩΝ

4.1 ΈΡΕΥΝΑ ΣΧΕΔΙΩΝ ΕΞΩΤΗΤΩΝ, ΑΞΙΟΛΟΓΙΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΣΧΕΔΙΟΥ

Όπως σε κάθε νέο πρότζεκτ, πριν από οποιοδήποτε βήμα ή κίνηση γίνει έπρεπε να μελετηθεί καλά η λειτουργία και η κατασκευαστική αρχή των εξωθητών. Η μελέτη έγινε είτε μέσω βιβλιογραφίας είτε μέσω διαδικτύου όπου αναζητήθηκαν υπάρχοντα σχέδια/κατασκευές μικρών εξωθητών. Μετά την έρευνα στο διαδίκτυο όπου ξεκίνησε από τους ιστότοπους Youtube.com και Google.com βρέθηκαν σελίδες με κάποια σχέδια εξωθητών από τα οποία κρατήθηκαν τα επικρατέστερα έξι που σημειώνονται παρακάτω.

1. Filastruder

Πληροφορίες: <http://www.filastruder.com>

2. Lyman filament extruder

Lyman filament extruder II

Πληροφορίες: <http://www.thingiverse.com/thing:34653>

Lyman filament extruder V3

Πληροφορίες: <http://www.thingiverse.com/thing:145500>

3. Filament extruder by ianmcmill

Πληροφορίες: <http://www.instructables.com/id/Build-your-own-3d-printing-filament-factory-Filame/?ALLSTEPS>

4. Low cost filament extruder by Xabbax

Πληροφορίες: <http://forums.reprap.org/read.php?70,205005>





5. Filabot wee

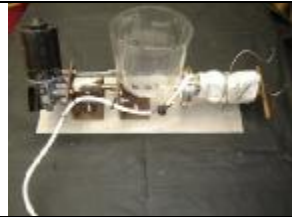

For info: <http://www.filabot.com/products/filabot-wee-kit-welded>

<http://makezine.com/projects/guide-to-3d-printing-2014/diy-filament-extruder/>

Τα βασικά χαρακτηριστικά στοιχεία αυτών των εξωθητών φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 4.1: Χαρακτηριστικά υποψήφιων σχεδίων

ΤΥΠΟΣ	ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΩΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΡΥΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ [g/min]	ΔΟΚΙΜΑΣΜΕΝΑ ΠΛΑΣΤΙΚΑ	ΛΟΓΟΣ L/D	ΚΟΣΤΟΣ (EURO)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ[οC]
FILASTRUDER		Έτοιμο πακέτο	Λίστα εξαρτημάτων και σχέδια μη διαθέσιμα	1.39	ABS,HDPE ,LDPE,PLA ,NYLON	Δεν δίνεται	255	Δεν δίνεται
LYMAN FILAMENT EXTRUDER II		Λίστα εξαρτημάτων και σχέδια διαθέσιμα	-	0.12	ABS	20:1	180	212
LYMAN FILAMENT EXTRUDER V3		Λίστα εξαρτημάτων και σχέδια διαθέσιμα	-	1.83	ABS	28.5:1	650	180
FILAMENT EXTRUDER BY IANMCMILL		Οδηγίες κατασκευής βήμα βήμα	Δεν είναι όλα τα σχέδια διαθέσιμα	11.5	ABS	28:1	110	220

ΤΥΠΟΣ	ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΑ	ΠΛΕΟΝΕ- ΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΩΝΕ- ΚΤΗΜΑΤΑ	ΡΥΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩ- ΓΗΣ[g/min]	ΔΟΚΙΜΑ- ΣΜΕΝΑ ΠΛΑΣΤΙ- ΚΑ	ΛΟΓΟΣ L/D	ΚΟΣΤΟΣ (EURO)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΕΦΑΡΜΟ- ΣΜΕΝΗ ΘΕΡΜΟΚ- ΡΑΣΙΑ[οC]
LOW COST FILAMENT EXTRUDER BY XABBAX		Απλή συναρμολόγη- ση	Μη διαθέσιμα σχέδια	Δεν δίνεται	Δεν έχει δοκιμαστεί	18:1	80	180
FILABOT WEE		Διαθέσιμη λίστα εξαρτημάτων, οδηγίες βήμα βήμα	-	1,44	ABS,PLA,H IPS	17:1	470	350

Στην συνέχεια θα σημειωθούν και θα κατηγοριοποιηθούν τα κριτήρια που θα μας οδηγήσουν στην αξιολόγηση των σχεδίων. Από τη μελέτη που έγινε διαπιστώθηκε πως οι εξωθητές έχουν παρόμοια βασικά μέρη με διαφορές σε σημεία βελτίωσης της διαδικασίας π.χ. θερμοζεύγη, ή δευτερεύουσας σημασίας όπως τη χοάνη τροφοδοσίας. Όπως είναι αναμενόμενο, το τελικό κόστος μίας τέτοιας συσκευής μπορεί να ποικίλει ανάλογα με την ισχύ, την ακρίβεια αλλά και τη σχεδίαση που αναζητά ο κατασκευαστής. Ο παρακάτω πίνακας δίνει τα κύρια μέρη και παραμέτρους ενός εξωθητή καθώς και προαιρετικά μέρη που οδηγούν στη βελτίωση της διαδικασίας

Πίνακας 4.2: Κύρια εξαρτήματα και παράμετροι ελέγχου ενός εξωθητή

ΒΑΣΙΚΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ	ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΕΞΩΘΗΣΗΣ
<ul style="list-style-type: none"> · Κοχλίας/τρομπάνι εξώθησης · Θάλαμος εξώθησης (extruder barrel) · Θάλαμος τροφοδοσίας (feed barrel) · Παροχή ρεύματος · Θερμαντικά στοιχεία (heating elements) · Κινητήρας · Ακροφύσιο · Κομπλέρ αξόνων τρομπανιού-κινητήρα 	<ul style="list-style-type: none"> · Μονωτές θερμότητας (θαλάμου εξώθησης και μόνωσης μεταξύ θαλάμου εξώθησης και θαλάμου τροφοδοσίας) · Σύστημα οδήγησης νήματος (puller roller) · Σύστημα ψύξης νήματος 	<ul style="list-style-type: none"> · Έλεγχος διαμέτρου νήματος: · Ακροφύσιο · PID ελεγκτής θερμοκρασίας · Θερμοζεύγη · Έλεγχος θερμοκρασίας ανά ζώνη · Ταχύτητα εξώθησης

Κριτήρια εξωθητών

Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται τα κριτήρια στα οποία θα βασιστεί η αξιολόγηση των εξωθητών. Στη πρώτη στήλη δίνεται η ονομασία του κριτηρίου. Στη δεύτερη δίνεται μια σύντομη εξήγηση του κριτηρίου και στη τρίτη οι κλίμακες βαθμολόγησης για το κάθε κριτήριο. Η κλίμακες των κριτηρίων έγιναν βάσει του εύρους των ιδιοτήτων από τους κατασκευαστές των εξωθητών.

Πίνακας 4.3: Κριτήρια και κλίμακες αξιολόγησης βάσει των χαρακτηριστικών των εξωθητών

ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΕΞΩΘΗΤΩΝ		
Απλότητα συναρμολόγησης (από υπάρχουσες πληροφορίες)	Πόσο εύκολο είναι να συναρμολογηθεί με τις διαθέσιμες οδηγίες;	6 – πολύ εύκολο (οδηγίες βήμα βήμα με εικόνες και λεπτομέρειες) 5 – εύκολο (οδηγίες, σχέδια και διαθέσιμες εικόνες) 4 – κανονικό (μερικές οδηγίες, σχέδια και εικόνες διαθέσιμες) 3 – Πρόκληση (εικόνες και σχέδια διαθέσιμα) 2 – δύσκολο (λίγες οδηγίες και εικόνες διαθέσιμες) 1 – πολύ δύσκολο (μόνο εικόνες ή/και βίντεο διαθέσιμα)

Ευελξία διαδικασιών (δοκιμασμένες)	Πόσα πλαστικά έχουν χρησιμοποιηθεί?	1 – κανένα (π.χ. ο χρήστης δεν ξέρει τι υλικό μπορεί να χρησιμοποιήσει) 2 – ένα (π.χ. μόνο ABS) 3 – δύο 4 – τρία 5 – τέσσερα 6 – πέντε και άνω
Ρυθμός παραγωγής	Πόσο γρήγορα παράγεται το προϊόν?	1 – άγνωστο από 2(ελάχιστο) έως 6(μέγιστο)
Λίστα εξαρτημάτων (BOM)	Πόσα εξαρτήματα που χρειάζονται παρέχει ο δημιουργός στη λίστα του;	2 – λίστα μη διαθέσιμη 3 – κάποια παρέχονται στις οδηγίες 4 – όλα τα σημαντικά παρέχονται 5 – όλα (εκτός βιδών κτλ) 6 – όλα στο BOM
Διαθεσιμότητα σχεδίων	Πόσα σχέδια παρέχει ο δημιουργός?	3 – κανένα (π.χ. μόνο οδηγίες και εικόνες) 4 – μερικά σχέδια διαθέσιμα 5 – τα περισσότερα είναι διαθέσιμα 6 – όλα τα σχέδια είναι διαθέσιμα
Χρόνος παράδοσης	Πόσο χρόνο πρέπει να περιμένουμε για τη λήψη των εξαρτημάτων?	4 – πάνω από μήνα 5 – δύο με τρεις εβδομάδες (εξαρτάται απ' τον προμηθευτή) 6 – λιγότερο από δύο (τοπικοί προμηθευτές)
Κόστος	Πόσα χρήματα θα χρειαστεί να ξοδέψουμε (σε ευρώ);	1 – περισσότερα από 650 2 – μεταξύ 470-649 3 – μεταξύ 255-469 4 – μεταξύ 180-254 5 – μεταξύ 110-179 6 – 80 (ελάχιστα)

Όπως παρατηρείται, οι κλίμακες έχουν ως όριο πάντα το έξι και ανάλογα με την ποικιλία των λύσεων και φθίνουν μέχρι το τέλος αυτών. Αυτό συμβαίνει ώστε να μην δημιουργεί μεγάλη διαφορά μεταξύ των κριτηρίων και αλλοιώσει το τελικό αποτέλεσμα. Ο αριθμός κάθε κλίμακας αποτελεί και τον βαθμό που θα δοθεί στον καθένα εξωθητή και οδηγήσει, (και με τη χρήση συντελεστών βαρύτητας για την περαιτέρω διόρθωση της κλιμάκωσης), στην τελική ανάλυση και αξιολόγηση για την επιλογή του κατάλληλου εξωθητή.

Ανάλυση και απόφαση

Ο πίνακας που ακολουθεί παρέχει την απάντηση στο ερώτημα ποιός εξωθητής είναι ο καταλληλότερος. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα στην αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκε και ένας συντελεστής βαρύτητας για κάθε κριτήριο με βάση τη σημασία του καθώς επίσης θα καλύψει την απλοποίηση που έγινε στην κλιμάκωση των κριτηρίων. Θεωρώντας ως 1 τον συντελεστή βαρύτητας για το λιγότερο σημαντικό κριτήριο, οι υπόλοιποι συντελεστές υπολογίστηκαν σε σχέση με αυτόν, δηλαδή πόσο πιο σημαντικό κρίνεται το εν λόγω κριτήριο σε σχέση με το κριτήριο ευελιξίας διαδικασιών που έχει συντελεστή 1.

Πίνακας 4.4: Τελική αξιολόγηση σχεδίων συνυπολογίζοντας τον συντελεστή βαρύτητας

Χαρακτηριστικά υποψήφιων σχεδίων								
ΕΞΩΘΗΤΗΣ	Απλότητα συναρμολόγησης	Ευελιξία διαδικασιών	Ρυθμός παραγωγής	Λίστα εξαρτημάτων (BOM)	Διαθεσιμότητα σχεδίων	Χρόνος παράδοσης	Κόστος	ΤΕΛΙΚΟ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑ
Συντελεστής βαρύτητας	2	1	1,5	2	2,5	4	1,5	-
FILASTRUDE R	1	6	3	2	2	4	3	42
LYMAN'S FIL.EXTR. II	3	2	2	6	6	6	4	68
LYMAN'S FIL.EXTR. V3	4	2	5	6	6	6	2	71,5
FILAMENT EXTRUDER BY IANMCMILL	5	2	6	4	3	5	5	64
LOW COST FILAMENT EXTRUDER BY XABBAX	2	1	1	3	3	5	6	49
FILABOT WEE	6	4	4	5	5	4	2	63,5

Είναι φανερό πως έστω και με μικρή διαφορά ο εξωθητής Lyman filament extruder v3 είναι ο καταλληλότερος για τη συνέχεια της εργασίας.

4.2 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΣΧΕΔΙΟΥ LYMAN FILAMENT EXTRUDER V3



Εικόνα 4.1: Lyman filament extruder v3 συναρμολογημένος

Ιδιότητες και πληροφορίες συναρμογής

Παρακάτω δίνονται τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά του εξωθητή:

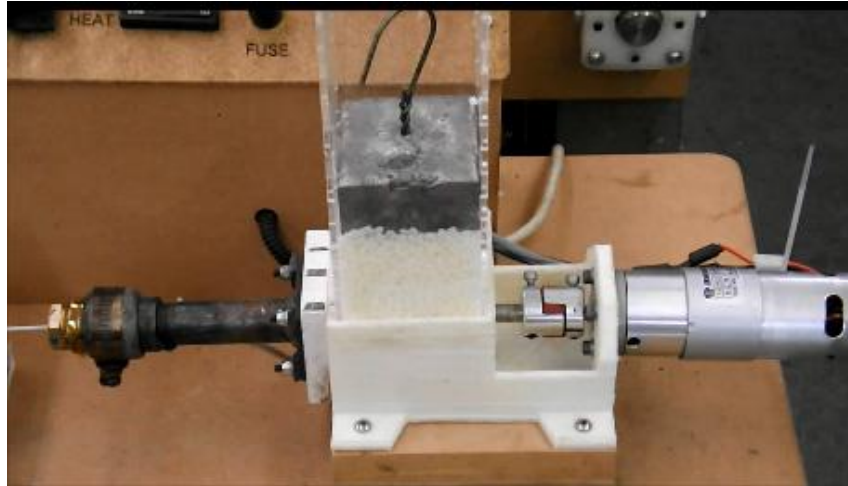
Παραγόμενο νήμα	Ρυθμός παραγωγής	L/D	Θερμοκρασία εξώθησης	Μέγιστη θερμοκρασία
1.75 mm ABS	περίπου 1.83 g/min	28.5:1	175 οC	180 οC

Εδώ βρίσκονται οι πληροφορίες που παρέχονται από τον πίνακα «Χαρακτηριστικά υποψήφιων σχεδίων»:

Απλότητα συναρμολόγησης	Διαθεσιμότητα BOM	Διαθεσιμότητα σχεδίων	Χρόνος παράδοσης	Κόστος
κανονικό (μερικές οδηγίες, σχέδια και εικόνες διαθέσιμες)	Όλα διαθέσιμα στο BOM	Όλα τα σχέδια διαθέσιμα	2 με 3 εβδομάδες	περίπου 650 ευρώ

Βασικά τμήματα εξωθητής

Το βασικότερο τμήμα του εξωθητή είναι αυτό όπου το πλαστικό εισέρχεται και λιώνει (ομογενοποίηση) για να διαμορφωθεί τελικά το νήμα.



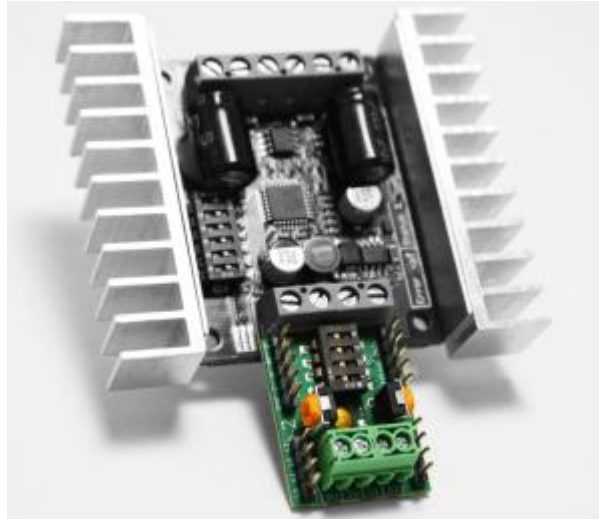
Εικόνα 4.2: Ολοκληρωμένο σύστημα εξώθησης Lyman filament extruder v3



Εικόνα 4.3: Εστίαση στο πρώτο στάδιο της διαδικασίας εξώθησης (βάση/χοάνη και τρυπάνι/κινητήρας)

Επεξεργαστής και motor driver (Sabertooth & Kangaroo)

Ο επεξεργαστής συγχρονίζει την ταχύτητα των κινητήρων της μηχανής και είναι τοποθετημένο στο πάνελ της.



Εικόνα 4.4: Οι Sabertooth και Kangaroo επεξεργαστής/motor driver (<https://www.dimensionengineering.com/products/kangaroo>)



Εικόνα 4.5: Οι Sabertooth & Kangaroo τοποθετημένοι στο πάνελ του εξωθητή

Δεξαμενή νερού με αντλία

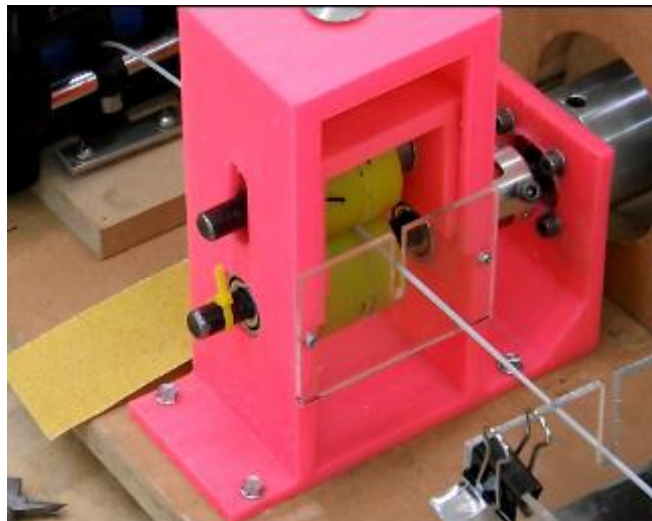
Αυτό είναι το τμήμα όπου το νήμα έχει εξωθηθεί και περνά από μια μικρή δεξαμενή νερού και μια μικρή σωλήνα βρέχει νήμα ώστε να το ψήξει πλήρως. Μια αντλία νερού από ενυδρείο χρησιμοποιείται για τη κυκλοφορία του νερού. Το νερό πρέπει να παραμένει ψυχρό.



Εικόνα 4.6: Δεξαμενή και αντλία νερού για ψύξη του νήματος

Συνδεσμολογία οδηγητή του νήματος (puller roller)

Αυτό είναι το τμήμα όπου το νήμα περνά από ένα μικρό σύστημα διέλευσης για αύξηση της ταχύτητας εξώθησης και για να επιτευχθεί ίση διάμετρος στο συνεχές νήμα.



Εικόνα 4.7: Συνδεσμολογία οδηγητή νήματος

Συσκευή μέτρησης νήματος (wind reel)

Μια συσκευή από καλάμι ψαρέματος χρησιμοποιείται και πρέπει να προσαρμοστεί κατάλληλα ώστε η ροή του υλικού να μπορεί να μετρηθεί.



Εικόνα 4.8: Συσκευή μέτρησης νήματος

Συνδεσμολογία τυλίγματος του νήματος

Εδώ, το νήμα τυλίγεται σε ένα καρούλι με τη βοήθεια ενός μικρού κινητήρα για καλύτερη αυτοματοποίηση της διαδικασίας.



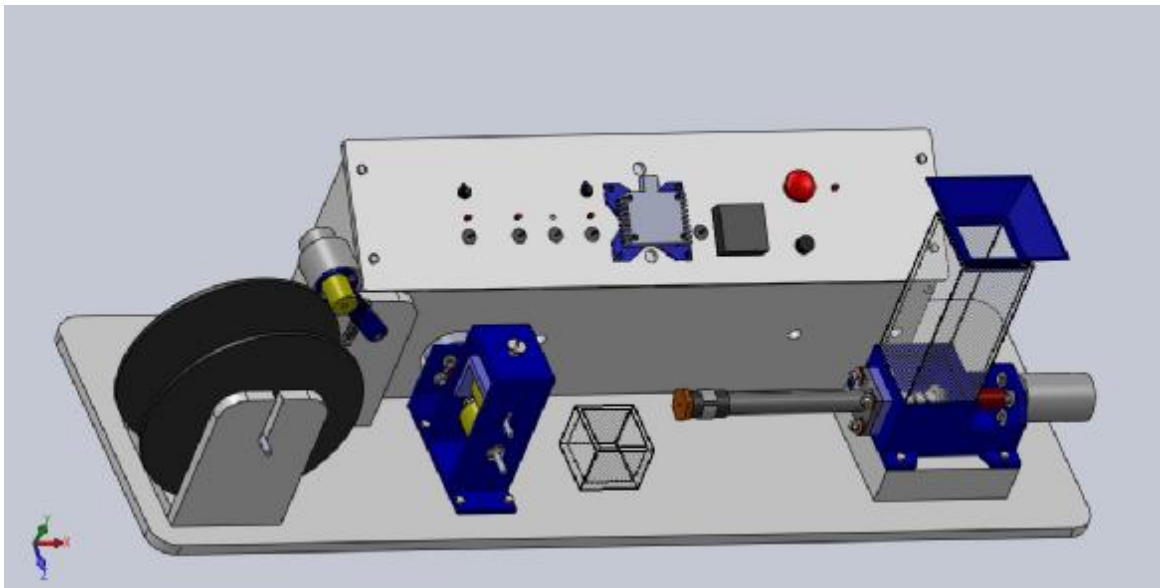
Εικόνα 4.9: Συνδεσμολογία τυλίγματος του νήματος

4.3 ΣΧΕΔΙΑΣΗ ΚΑΙ ΕΡΕΥΝΑ ΑΓΟΡΑΣ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

Από τη στιγμή που έχει αποφασιστεί σε ποίο σχέδιο θα βασιστεί η εργασία, σειρά έχει η σχεδίαση του εξωθητή μέσω του λογισμικού σχεδίασης Solidworks και η έρευνα αγοράς των πρώτων βασικών εξαρτημάτων του εξωθητή. Η σχεδίαση βοήθησε πολύ στη συναρμολόγηση του εξωθητή και στην έρευνα αγοράς εξαρτημάτων γιατί σαν οδηγός, μας δείχνει παραμέτρους που δεν μπορούν να φανούν με άλλο τρόπο από τη στιγμή που σε πρώτο στάδιο δεν υπάρχουν διαθέσιμες κατασκευές. Η διαδικασία της ανάπτυξης και της σχεδίασης του εξωθητή της εργασίας έγινε με τη σειρά που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Το πρότζεκτ «Lyman filament extruder v3» περιείχε όλα τα μηχανολογικά σχέδια των κομματιών του εξωθητή. Συνεπώς, υπήρξε η δυνατότητα απευθείας

έναρξης της σχεδίασης των κομματιών στο Solidworks όπου θα αποτελούσε το πρωτότυπο για τη συνέχεια. Το αποτέλεσμα με βάση αυτά τα σχέδια βρίσκεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.10: Αποτέλεσμα σχεδίασης του Lyman filament extruder v3 στο solidworks

Παράλληλα με τη σχεδίαση του εξωθητή έγινε και έρευνα αγοράς των πρώτων βασικών εξαρτημάτων όπως τρυπάνια, βηματικός κινητήρας, motor driver, processor και ηλεκτρολογικά εξαρτήματα όπως καλώδια, διακόπτες κτλ. Πρέπει να σημειωθεί πως βηματικός κινητήρας επιλέχθηκε λόγω του ότι οι βηματικοί κινητήρες έχουν υψηλή ροπή και δυνατότητα ελέγχου της ταχύτητας τους. Η επιλογή ενός τέτοιου κινητήρα έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη ενός επεξεργαστή για τον προγραμματισμό του κινητήρα, καθώς και έναν motor driver για την μετατροπή του σήματος σε παλμούς ώστε να δεχθεί κατάλληλα το σήμα το βηματικό μοτέρ.

Η έρευνα αγοράς αυτών των τριών κομματιών κατέληξε στη αγορά ενός Arduino UNO Rev3 (processor/Microcontroller), ενός pololu a4988 (bipolar stepper motor driver) και ενός βηματικού κινητήρα με μειωτήρα στροφών. Τα χαρακτηριστικά των αναφέρονται παρακάτω.

Arduino UNO Rev3

Ο arduino uno είναι μια επεξεργαστική πλακέτα ελέγχου ηλεκτρονικών συστημάτων. Η εταιρία παρέχει το περιβάλλον για τον προγραμματισμό του ανάλογα την διαδικασία που χρειάζεται να πραγματοποιηθεί. Έχει θύρα USB με την οποία συνδέεται και τροφοδοτείται από υπολογιστή. Περισσότερες πληροφορίες στη σελίδα της arduino: <http://arduino.cc/en/main/arduinoBoardUno>



Εικόνα 4.11: Κάτοψη arduino UNO

Pololu a4988

Ο pololu a4988 είναι ένας motor driver που συνδέεται με τον arduino με σκοπό την λήψη του σήματος και τη μετατροπή του σε παλμούς ώστε να κινηθεί ο διπολικός (bipolar) βηματικός κινητήρας.

Λειτουργεί σε τάση από 8 έως 35 V και μπορεί να δώσει στον κινητήρα έως 2 A έντασης ρεύματος. Περισσότερες πληροφορίες για τον motor driver της pololu στην ιστοσελίδα: <https://www.pololu.com/product/1182>



Εικόνα 4.12: A4988 stepper motor driver της pololu

Bipolar Stepper motor 12V

Ο βηματικός κινητήρας επιλέγεται βάσει της ισχύς που πρέπει να έχει καθώς και με κριτήριο το κόστος και την μέγιστη παροχή ρεύματος που δίδεται από τον motor driver. Ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται στην επιλογή ζευγαριού motor driver και βηματικού κινητήρα καθώς η καταλληλότητα τους εξαρτάται από τους πόλους του κινητήρα. Έτσι, ο κινητήρας που επιλέχθηκε είναι ένας διπολικός 12 V στα 1.7 A με μειωτήρα στροφών σχεδόν 100:1 που δίνει μέγιστη ροπή μετρημένη από τον κατασκευαστή ίση με 48 kg*cm και 34 rpm μέγιστες στροφές.

Πίνακας 4.5: Ιδιότητες βηματικού κινητήρα

Motor Properties

Motor Type	Bipolar Stepper
Manufacturer Part Number	42STH38-1684B / 36JXS60K99.51
Step Angle	0.018°
Step Accuracy	± 5 %
Holding Torque	48 kg·cm
Rated Torque	48 kg·cm
Maximum Speed (w/1067 Motor Controller)	34 RPM
Acceleration at Max Speed (w/1067 Motor Controller)	1.2E+06 1/16 steps/sec ²

Electrical Properties

Recommended Voltage	12 V DC
Rated Current	1.7 A
Coil Resistance	1.7 Ω
Phase Inductance	3.2 H

Physical Properties

Shaft Diameter	8 mm
Rear Shaft Diameter	3.9 mm
Mounting Plate Size	NEMA - 17
Weight	564 g
Number of Leads	4
Wire Length	300 mm

Gearbox Properties

Gearbox Type	Planetary
Gear Ratio	99 1044/2057 : 1
Backlash Error	1 1/2°
Maximum Strength of Gears	48 kg·cm
Shaft Maximum Axial Load	49.1 N
Shaft Maximum Radial Load	98.1 N



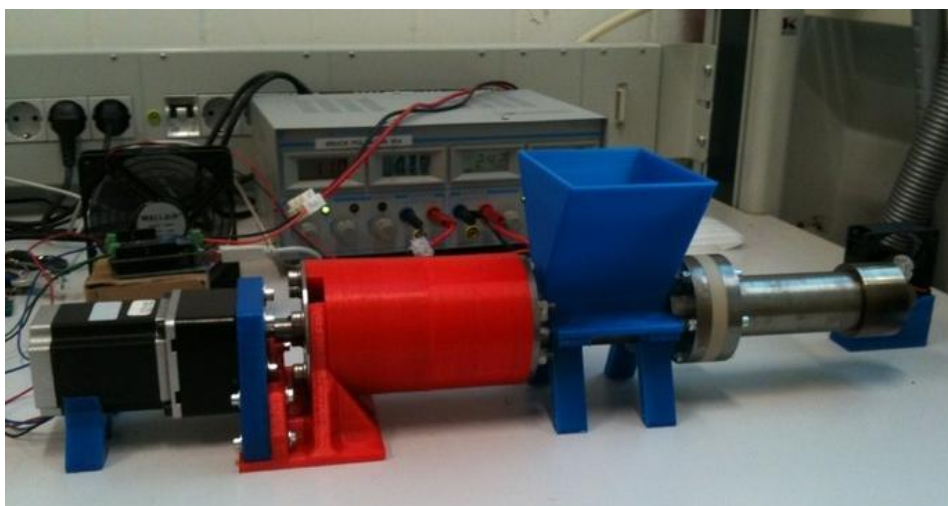
Εικόνα 4.13: Βηματικός κινητήρας τύπου NEMA-17

Η συνδεσμολογία των εξαρτημάτων αυτών καθώς και ο προγραμματισμός του arduino θα αναλυθούν σε επόμενη ενότητα. Μετά το ηλεκτρονικό κομμάτι σειρά έχει το μηχανολογικό κομμάτι του εξωθητή για την πρώτη έρευνα αγοράς. Το πρώτο και βασικότερο ίσως εξάρτημα για τη συνέχεια του σχεδιασμού που αναζητήθηκε είναι το τρυπάνι εξώθησης. Από αυτό θα εξαρτηθεί το μέγεθος του εξωθητή, δηλαδή ο λόγος L/D και συνεπώς η κατασκευή των θαλάμων εξώθησης και τροφοδοσίας, ακροφυσίου, θερμαντικών στοιχείων κτλ. Το τρυπάνι που επιλέχθηκε είναι ένα οφιοειδές τύπου τρυπάνι ενεργού μήκους 225 mm και διαμέτρου 20 mm. Αυτό μας οδηγεί αμέσως στο συμπέρασμα ότι ο λόγος L/D του εξωθητή είναι σχεδόν 11:1 που δείχνει πως είναι ένας πολύ κοντός εξωθητής.



Εικόνα 4.14: Σχέδιο οφιοειδούς τρυπανιού στο solidworks

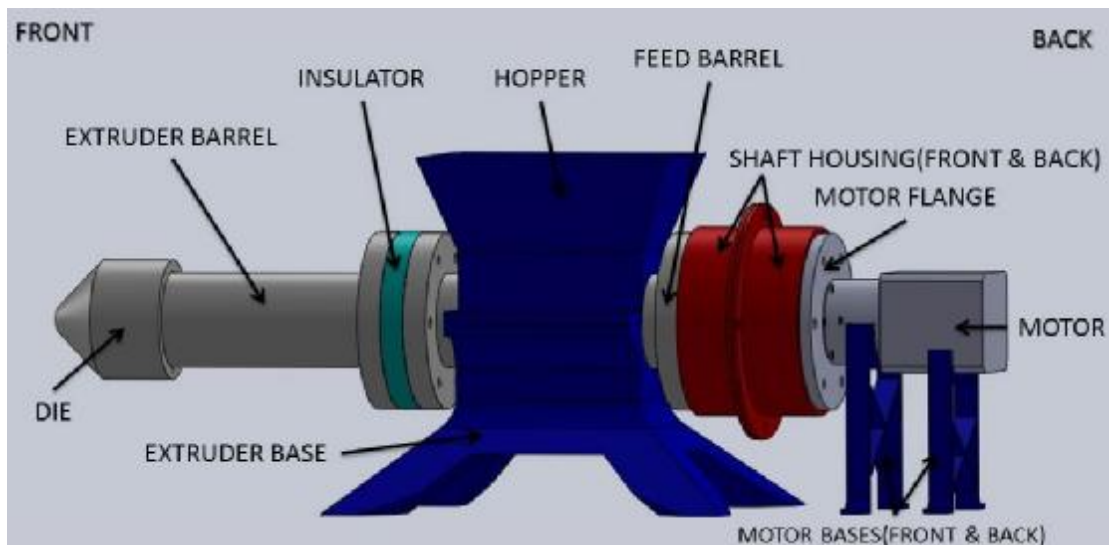
Στη πορεία της έρευνας βρέθηκε ένα νέο σχέδιο μικρού εξωθητή, πιο μοντέρνο, από το οποίο υιοθετήθηκαν κάποια βασικά τμήματα και έφεραν αλλαγές στον αρχικό σχεδιασμό του εξωθητή.



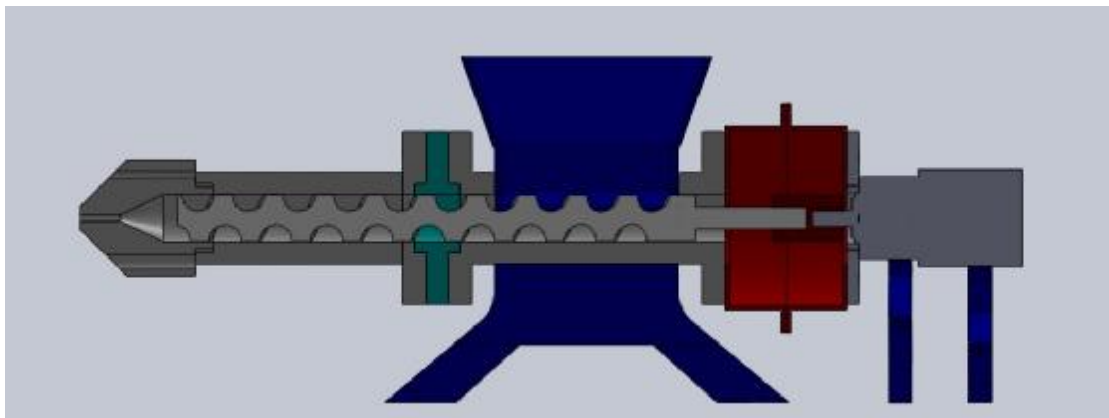
Εικόνα 4.15: Εξωθητής πλαστικού από τον Bender24601, χρήστη του thingiverse.com (<http://www.thingiverse.com/thing:83570>)

Βάσει αυτού του πρότζεκτ συνέχισε ο σχεδιασμός και έγιναν εκ νέου σχέδια για το κομμάτι του εξωθητή της πτυχιακής εργασίας. Τα υπόλοιπα τμήματα όπως το πάνελ και το τμήμα τύλιξης του νήματος παρέμειναν ίδια.

Το νέο στάδιο σχεδιασμού έχει ως αποτέλεσμα τα παρακάτω σχέδια.



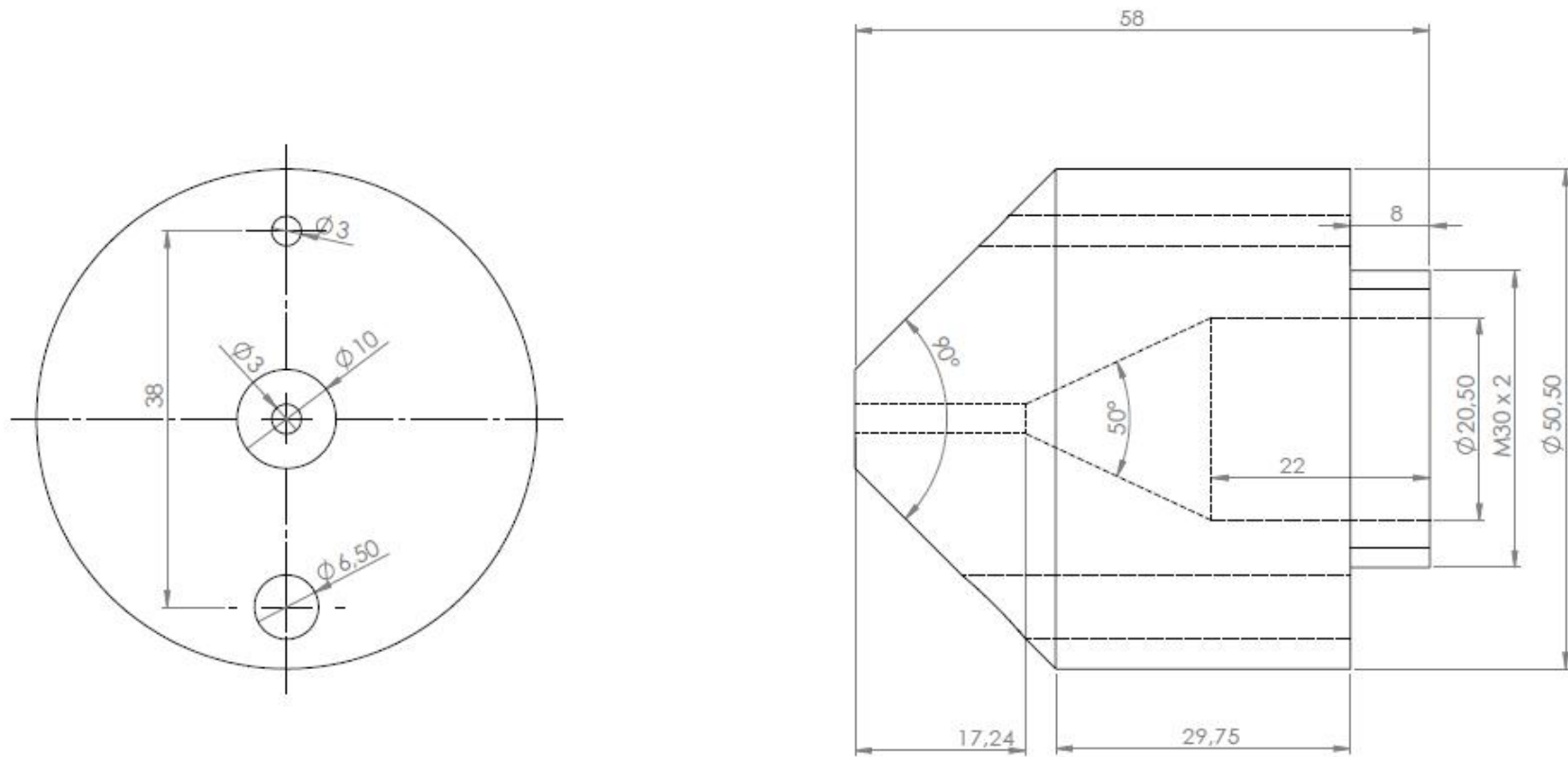
Εικόνα 4.16: Σχέδιο εξωθητή μετά τις αλλαγές του νέου πρότζεκτ με ετικέτες για το κάθε μέρος του



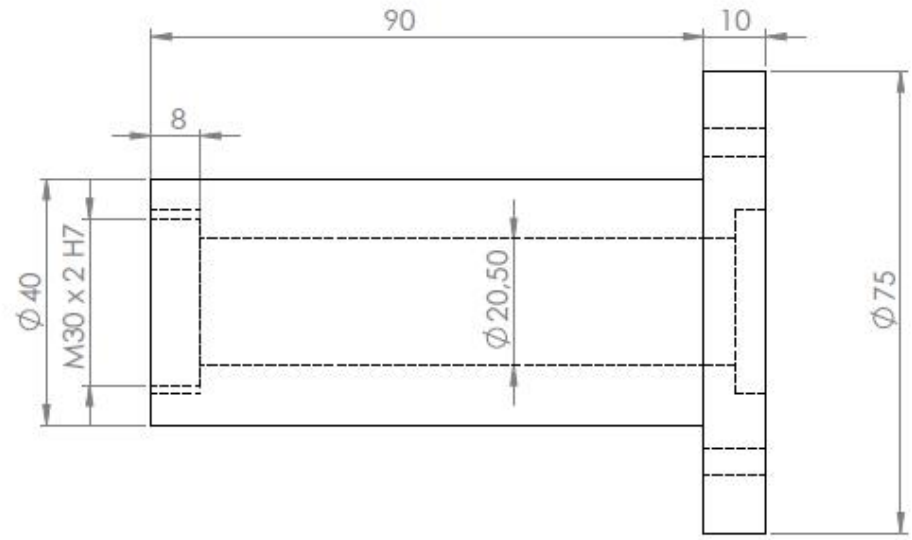
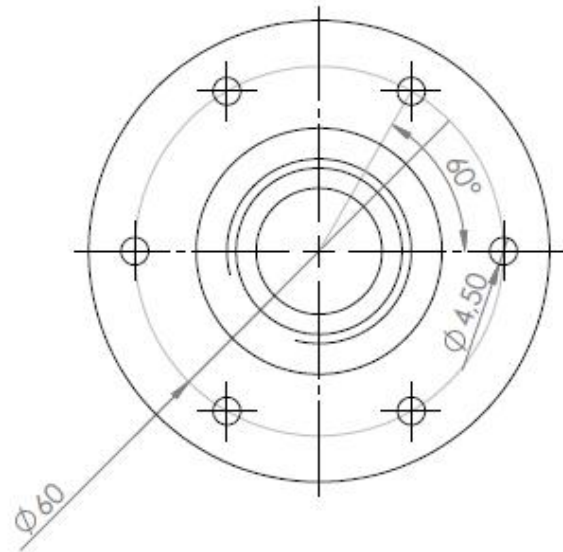
Εικόνα 4.17: Σχέδιο εξωθητή σε τομή

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το τρυπάνι είναι το κομμάτι του εξωθητή από το οποίο εξαρτώνται οι διαστάσεις σχεδόν όλων των άλλων εξαρτημάτων του εξωθητή. Μεταξύ αυτών, το ακροφύσιο (die), το extruder barrel και το feed barrel τα οποία είναι σειρά τους να γίνουν μηχανολογικά σχέδια και να κατασκευαστούν. Το die και το extruder barrel αρχικά, σχεδιάστηκαν σε μορφή μηχανολογικών σχεδίων και δόθηκαν στο μηχανουργείο του πανεπιστημίου για την κατασκευή τους. Όλα τα μεταλλικά μέρη κατασκευάστηκαν από ανοξείδωτο ασάλι για την αποφυγή οξειδωσης τους από την υγρασία των πολυμερών. Τα μηχανολογικά σχέδια καθώς και τα προϊόντα που λήφθηκαν από το μηχανουργείο φαίνονται στη συνέχεια.

Να σημειωθεί πως για λόγους προτυποποίησης, σταδιακής και ομαλής ανάπτυξης του πρότζεκτ, το feed barrel του εξωθητή αρχικά τυπώθηκε στον 3D εκτυπωτή του εργαστηρίου από ABS (Acrylonitrile butadiene styrene).



Εικόνα 4.18: Μηχανολογικό σχέδιο ακροφυσίου (die)



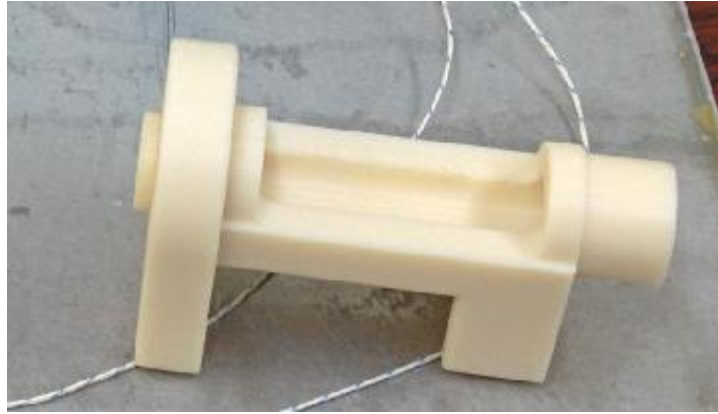
Εικόνα 4.19: Μηχανολογικό σχέδιο extruder barrel



Εικόνα 4.20: Ακροφύσιο από ανοξείδωτο ασάλι



Εικόνα 4.21: Extruder barrel από ανοξείδωτο ασάλι



Εικόνα 4.22: Feed barrel τυπωμένο από ABS

4.4 ΚΙΝΗΣΗ ΒΗΜΑΤΙΚΟΥ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ARDUINO

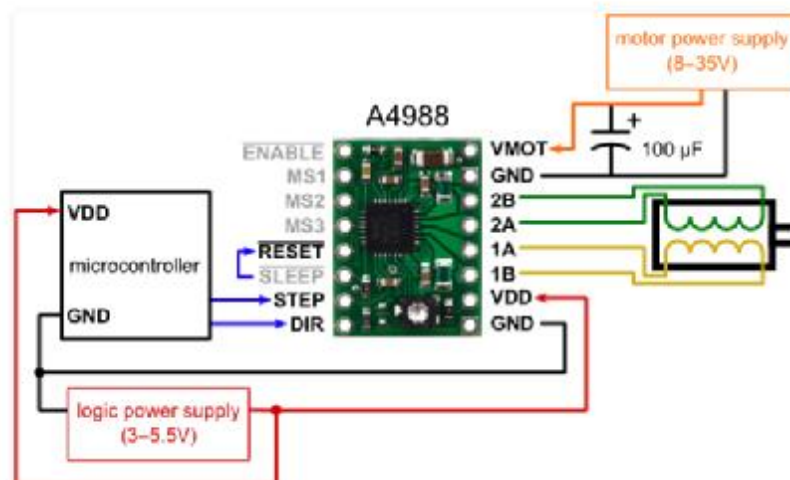
Όπως προαναφέρθηκε, για την κίνηση οποιουδήποτε βηματικού κινητήρα απαιτείται η μετατροπή της εισόδου του σε παλμούς. Αυτή είναι δουλειά για έναν motor driver (rololu a4988). Για να λειτουργήσει όμως με τον τρόπο που θέλουμε ο κινητήρας χρειάζεται επίσης ένας μικρός επεξεργαστής ή microcontroller (arduino) που, ανάλογα το πρόγραμμα του φορτώνεται, δίνει σήμα στον motor driver για να κινηθεί. Ο προγραμματισμός του arduino γίνεται στο περιβάλλον που παρέχεται από την Arduino και έχει ως βάση την Java. Έπειτα από μελέτη, ο προγραμματισμός κατέληξε στο παρακάτω πρόγραμμα.

```
working_one_direction_  
void setup()  
{  
    pinMode(6,OUTPUT);  
    pinMode(7,OUTPUT);  
}  
  
void loop(){  
    digitalWrite(7,HIGH);  
    delayMicroseconds(500);  
    digitalWrite(7,LOW);  
    delayMicroseconds(500);  
}
```

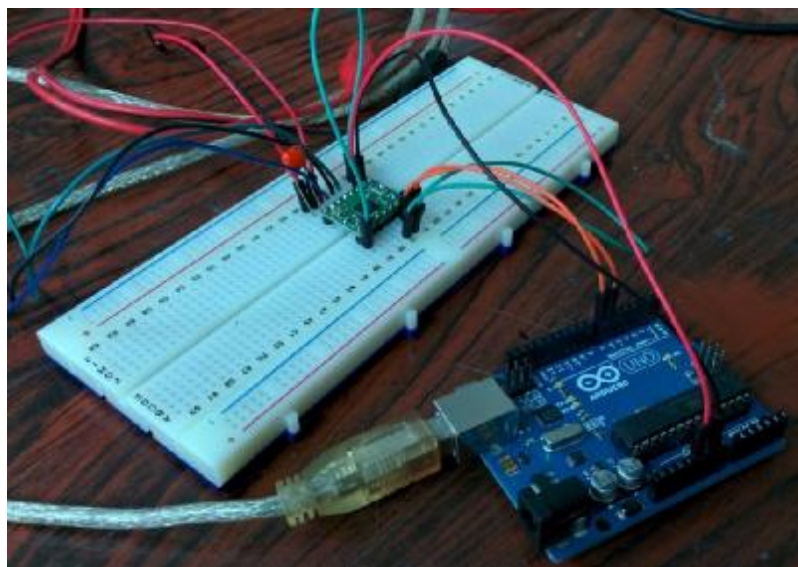
Εικόνα 4.23: Πρόγραμμα κίνησης arduino σε μία κατεύθυνση στο περιβάλλον της Arduino

Στην εντολή void setup() δηλώνονται οι σταθερές μεταβλητές του προγράμματος όπως οι εισοδοί και έξοδοι της πλακέτας. Δηλαδή, η εντολή pinMode() χρησιμοποιείται για να αντιστοιχίσει μια σύνδεση του arduino(pin) στο αν θα είναι είσοδος ή έξοδος. Στην εντολή void loop() εισέρχονται οι εντολές που επαναλαμβάνονται συνεχώς όπως για παράδειγμα αυτή της κίνησης του κινητήρα ή της κατεύθυνσης του. Η εντολή digitalWrite() είναι αυτή με ελέγχει το αν κάποιο pin του arduino θα είναι on(high) ή off(low). Η εντολή delayMicroseconds() ελέγχει τη

χρονική απόσταση μεταξύ δύο παλμών του βηματικού κινητήρα σε μικροδευτερόλεπτα(10-6 seconds). Παρατηρήθηκε ότι με 500 μικροδευτερόλεπτα έχουμε τη μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να δοθεί από το κύκλωμα.



Εικόνα 4.24: Σχέδιο σύνδεσης του pololu a4988 motor driver με διπολικό βηματικό κινητήρα, microcontroller(arduino) και τη παροχή ρεύματος



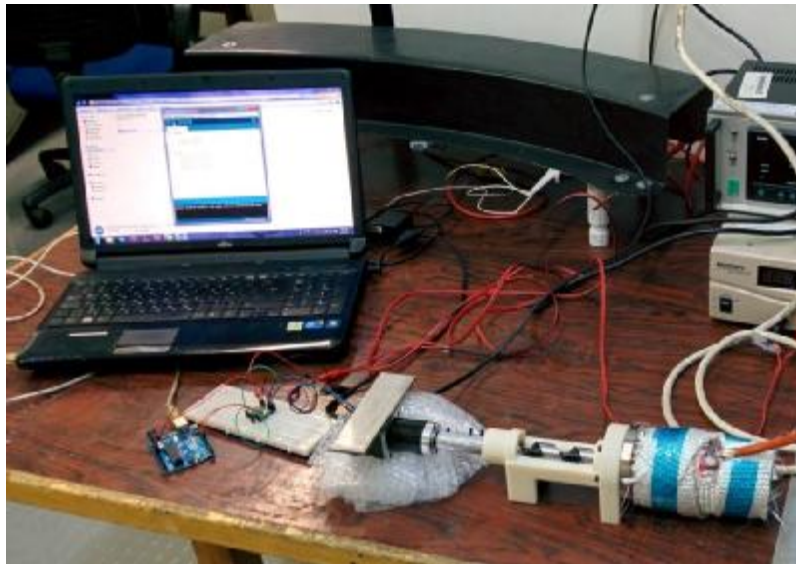
Εικόνα 4.25: Συνδέσεις motor driver με Arduino και βηματικό κινητήρα

Αφού εξηγήθηκαν οι συνδέσεις των εξαρτημάτων παραπάνω, σειρά έχει το αποτέλεσμα αυτών των συνδέσεων. Όπως φάνηκε, ο κινητήρας δεν έδινε τη μέγιστη ισχύ που μπορούσε, καθώς λειτούργησε με μέγιστη ταχύτητα περίπου 3 rpm. Σαφώς, η ταχύτητα αυτή είναι πολύ μικρή και μετά από θεωρητικό υπολογισμό η παραγωγικότητα βρέθηκε στα 12 cm/min πλαστικού μιας μέσης πυκνότητας.

Η απόδοση αυτή του βηματικού κινητήρα φάνηκε να οφείλεται στο ρεύμα που εισερχόταν σε αυτόν καθώς μετρήθηκε σε 0,5 A αντί 1,7 A που χρειαζόταν για τη μέγιστη ισχύ του. Ο λόγος ήταν ο περιορισμός στην ένταση του ρεύματος που επέτρεπε ο motor driver καθώς λόγω υπερθέρμανσης του δεν κατάφερε να δώσει τα 1,7 A που είχε τη δυνατότητα να δώσει. Το αποτέλεσμα σε αυτή τη τροφοδοσία δεν είναι μόνο μείωση των στροφών αλλά και η μείωση της ροπής του κινητήρα κάτι που μπορεί να αποβεί μοιραίο για τη λειτουργία του εξωθητή, μολονότι τα φορτία που καλείται να ξεπεράσει είναι μεγάλα.

4.5 ΠΡΩΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΠΡΟΤΥΠΗΣ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΛΟΓΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ

Γνωρίζοντας πως ο κινητήρας δεν δίνει τη μέγιστη ισχύ, έγινε δοκιμή σε μια πρωτότυπη συναρμολόγηση χωρίς πλαστικό, για να διαπιστωθεί εάν η λειτουργία του κινητήρα είναι επαρκής ή μη.



Εικόνα 4.26: Διάταξη πρώτης δοκιμής εξωθητή

Κατά τη δοκιμή της συναρμολόγησης αποδεικνύεται η αδυναμία του κινητήρα που αναφέρθηκε παραπάνω. Δεν είχε αρκετή ροπή να ξεπεράσει τις τριβές και σταμάτησε να λειτουργεί σχεδόν αμέσως. Αυτή η εμπλοκή οδήγησε στην απόφαση της αντικατάστασης του βηματικού κινητήρα με κάποιον απλούστερο στη λειτουργία και πιο ισχυρό. Η αναζήτηση και επιλογή του νέου κινητήρα αναλύεται περαιτέρω σε επόμενο κεφάλαιο.

ΕΠΙΛΟΓΗ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΑΝΤΙΣΤΑΣΕΩΝ

Η θέρμανση του εξωθητή είναι ίσως το σημαντικότερο στοιχείο που πρέπει να καλυφθεί διότι σε έναν εξωθητή τόσο μικρών διαστάσεων, οι τριβές δεν είναι αρκετά ισχυρές ώστε να ανεβάσουν όσο χρειάζεται τη θερμοκρασία. Έτσι, χρειάζεται κάποιο θερμαντικό στοιχείο με αρκετή ισχύ ώστε να υπερκαλύψει τις θερμικές ανάγκες για την τήξη οποιουδήποτε θερμοπλαστικού. Στη περίπτωση θέρμανσης του θαλάμου εξώθησης μπορούν χρησιμοποιηθούν τριών ειδών αντιστάσεις, αυτές είναι: βαρελάκια(cartridge), τύπου δακτυλιδιού(band heaters) είτε κουβέρτες θέρμανσης. Οι τελευταίες δεν προτιμήθηκαν γιατί δεν οδηγούν σε αρκετά υψηλές θερμοκρασίες(το πολύ 250 οC).

Η έρευνα αγοράς θερμικών αντιστάσεων οδήγησε στην αξιολόγηση κάποιων από τις επιλογές των οποίων οι κατασκευαστές έδιναν αρκετά χαρακτηριστικά. Αυτές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα. Η απόφαση μετά την έρευνα ήταν η επιλογή αντίστασης τύπου δακτυλιδιού διότι έχουν τη δυνατότητα να φτάσουν σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τις υπόλοιπες, κάτι που χρειάζεται αν υπάρχει ανάγκη για ασφαλή επένδυση στη μελλοντική χρήση ακόμα ανθεκτικότερων πλαστικών (π.χ. ενισχυμένων με μικροσωματίδια). Επίσης, αυτή η επιπλέον ισχύ θα χρειαστεί μολονότι η μέγιστη θερμοκρασία που φτάνει η αντίσταση όπως είναι φυσικό και

γνωστό από τη μετάδοση θερμότητας, δεν σημαίνει πως είναι και αυτή που θα επικρατεί στα θάλαμο εξώθησης (melting zone), λόγω μεταφοράς θερμότητας σε κύλινδρο πάχους 1 cm από τη μία πλευρά, και απώλειες θερμότητας προς τον αέρα από την άλλη.

Για τις απώλειες, είναι αναγκαίο να κατασκευαστεί μια πολυστρωματική μόνωση που θα τις ελαχιστοποιήσει. Το κομμάτι της μόνωσης θα αναλυθεί στην ομώνυμη ενότητα. Να σημειωθεί, πως ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας για ένα κοινό ανοξειδωτο ατσάλι είναι περίπου 14 W/mK.

Ως μια θεωρητική προσέγγιση για την εσωτερική θερμοκρασία του extruder barrel, μελετήθηκε η εγκάρσια μετάδοση θερμότητας βάσει του νόμου του Fourier και της εξίσωσης Laplace σε κύλινδρο πάχους 1 cm και μήκους 5 cm(ενεργό θερμαινόμενο μήκος λόγω θερμικής αντίστασης),σε σταθερή κατάσταση(steady state) για διάφορες τιμές εξωτερικής θερμοκρασίας

Πίνακας 4.6: Θερμοκρασία εσωτερικού τοιχώματος extruder barrel για διάφορες θερμοκρασίες εξωτερικής επιφάνειας

Q[W]	T2[°C]	2πκL[W/m]	ln(r2/r1)	T1 [°C]
360	200	4,40	0,67	145,3
	250			195,3
	300			245,3
	350			295,3
	400			345,3
	450			395,3
	500			445,3

Ο παραπάνω υπολογισμοί έγιναν με τη χρήση του νόμου του Fourier(3.1) και την εξίσωση Laplace(3.2):

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx} \text{ (Watt)} \quad (3.1)$$







$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (3.2)$$

Από τον πίνακα διαπιστώνεται πως αν η αντίσταση επιφέρει μία θερμοκρασία στο εξωτερικό τοίχωμα του θαλάμου εξώθησης, η θερμοκρασία του εσωτερικού τοιχώματος θα είναι περίπου 55 οC μικρότερη. Στη μελέτη δεν συνυπολογίστηκε η ύπαρξη μόνωσης.



Εικόνα 4.27: Θερμική αντίσταση τύπου δακτυλιδιού συνδεδεμένη με το extruder barrel

Πίνακας 4.7: Επιλογές θερμαντικών στοιχείων και χαρακτηριστικά τους

ΘΕΡΜΟΣΤΟΙΧΕΙΟ	ΔΙΑΣΤΑΣΕΙΣ (D*H)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ[°C]	ΙΣΧΥΣ[W]	ΠΡΟΜΗΘΕΥΤΗΣ
	6,35*100 6,35*125	800	300 400	RS
	40*30 40*38 40*50 40*60	340	200 270 345 415	RS
	6,35*(25 μέχρι 152)	760	50 to 400(εξαρτάται από το μήκος και τάση)	omega
	40*40 40*50	482	HBA Series: 200 μέχρι 500	omega
	38,1*25,4 38,1*38,1 38,1*50,8	480	150 250 300	omega
	N/A	650	N/A	Micagr

4.6 ΜΟΝΩΣΗ ΘΑΛΑΜΟΥ ΕΞΩΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΕΙΡΑΜΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Δεν θα ήταν εφικτό να επιτευχθούν οι επιθυμητές θερμοκρασίες από την αντίσταση του συστήματος εάν αυτό δεν ήταν κατάλληλα μονωμένο .

Η μόνωση που χρησιμοποιήθηκε αποτελείται από τρεις διαφορετικές στρώσεις :

- **Αλουμινόχαρτο**

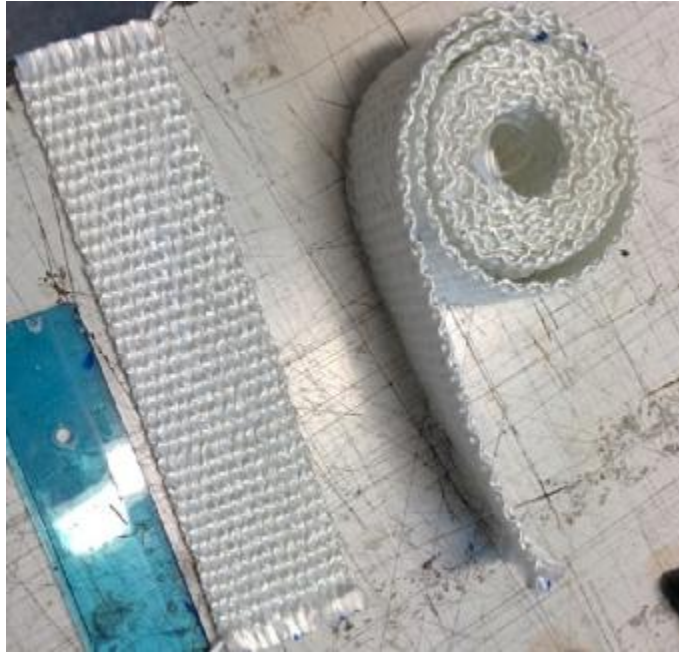
Η πρώτη στρώση είναι δύο φύλλα αλουμινίου με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω ακτινοβολίας . Το αλουμινόχαρτο έχει την ιδιότητα να αντανακλά αυτό το είδος θερμότητας και να το επιστρέφει στην πηγή του.



Εικόνα 4.28: Φύλλα αλουμινίου (οικιακής χρήσης)

- **Υαλοταινία**

Η δεύτερη στρώση είναι υαλοταινία, η οποία, κατασκευασμένη από ίνες γυαλιού προσφέρει καλή μόνωση, καθώς ο συντελεστής αγωγιμότητας του γυαλιού ισούται με περίπου 1 W/mK ανάλογα την περιεκτικότητα σε διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2) και αντοχή μέχρι τους $550 \text{ }^\circ\text{C}$.



Εικόνα 4.29: Υαλοταινία

- **Κουβέρτα γυαλιού**

Τέλος, η τρίτη στρώση είναι υαλοκουβέρτα με την οποία επιτυγχάνουμε άριστη μόνωση με την αντοχή της να φτάνει περίπου στους 200 °C .



Εικόνα 4.30: Κουβάρι υαλοκουβέρτας



Εικόνα 4.31: Πολυστρωματική μόνωση extruder barrel

ΠΕΙΡΑΜΑ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Το πείραμα θέρμανσης που διεξίχθει είναι πολύ σημαντικό καθώς θα δείξει ποιό είναι το εύρος θερμοκρασιών που θα λειτουργεί ο εξωθητής αλλά και θα φανερώσει σε πολύ μεγάλο βαθμό το θερμοκρασιακό προφίλ του. Οι μετρήσεις έγιναν σε τρία διαφορετικά σημεία ,(μύτη ακροφυσίου, στο σημείο εφαρμογής της θερμότητας και στη φλάντζα του extruder barrel). Επίσης ,μελετήθηκε και ο ρυθμός ανάπτυξης της θερμοκρασίας και αποτυπώθηκε σε κατάλληλα διαγράμματα για διαφορετικά ποσοστά εκμετάλλευσης της αντίστασης .Για τον έλεγχο αυτού του ποσοστού εκμετάλλευσης (ή χρήσης) της αντίστασης χρησιμοποιείται dimmer.



Εικόνα 4.32: Πειραματική διάταξη

Αναλυτικά, η πειραματική διάταξη αποτελείτο από τα εξής στοιχεία:

1. Extruder barrel με die (μύτη):

Το κομμάτι στο οποίο θα λάβει χώρα η τήξη του πολυμερούς. Μας ενδιαφέρει στο εσωτερικό του, να αγγίζει και να ξεπερνά τη θερμοκρασία τήξης του εκάστοτε πολυμερούς.



Εικόνα 4.33: Extruder barrel με die(μύτη)

2. Αντίσταση κολάρο :

Η αντίσταση πρέπει να είναι ισχύος αρκετής ώστε να φτάνει το σύστημα στις επιθυμητές θερμοκρασίες .Η συγκεκριμένη έχει ισχύ 360 W και μπορεί να φτάσει έως 500 οC.



Εικόνα 4.34: Αντίσταση τύπου κολάρου

3. Dimmer :

Ο dimmer χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της αντίστασης συνεπώς της θερμοκρασίας του συστήματος καθώς δεν είναι πάντα επιθυμητή η μέγιστη ισχύς της αντίστασης .Ο συγκεκριμένος dimmer έχει ανώτατο όριο φορτίου 1500 W .

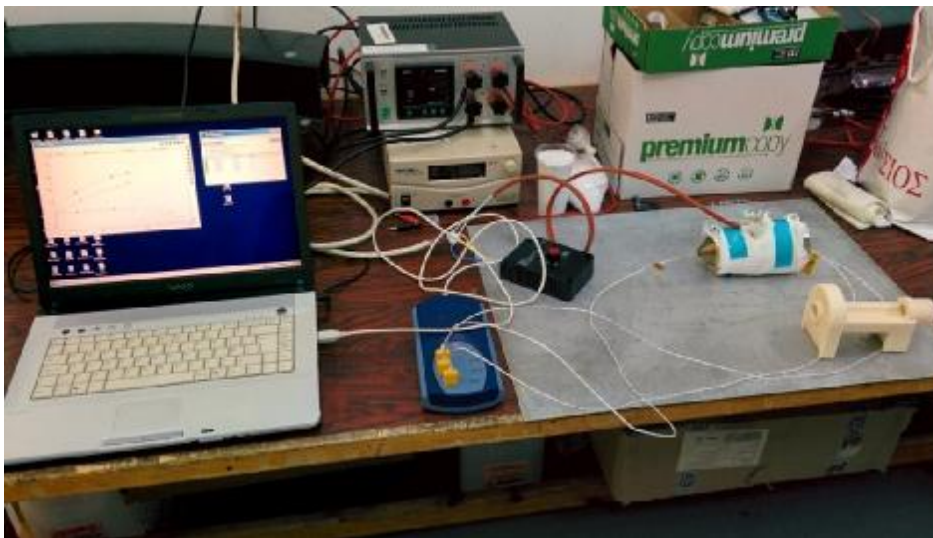


Εικόνα 4.35: Light dimmer ED-1

4. Εξωτερική μόνωση

5. Θερμοζεύγοι και συσκευή μέτρησης :

Για τη μέτρηση της θερμοκρασίας χρησιμοποιήθηκαν θερμοζεύγη τύπου Κ και κατάλληλη συσκευή (rico logger) για τη δειγματοληψία των μετρήσεων. Μέσω κατάλληλου λογισμικού ο rico logger δειγματοληπτεί με ότι συχνότητα επιθυμεί ο χρήστης ενώ ταυτόχρονα καταγράφει τις μετρήσεις σε πίνακες και γραφήματα.

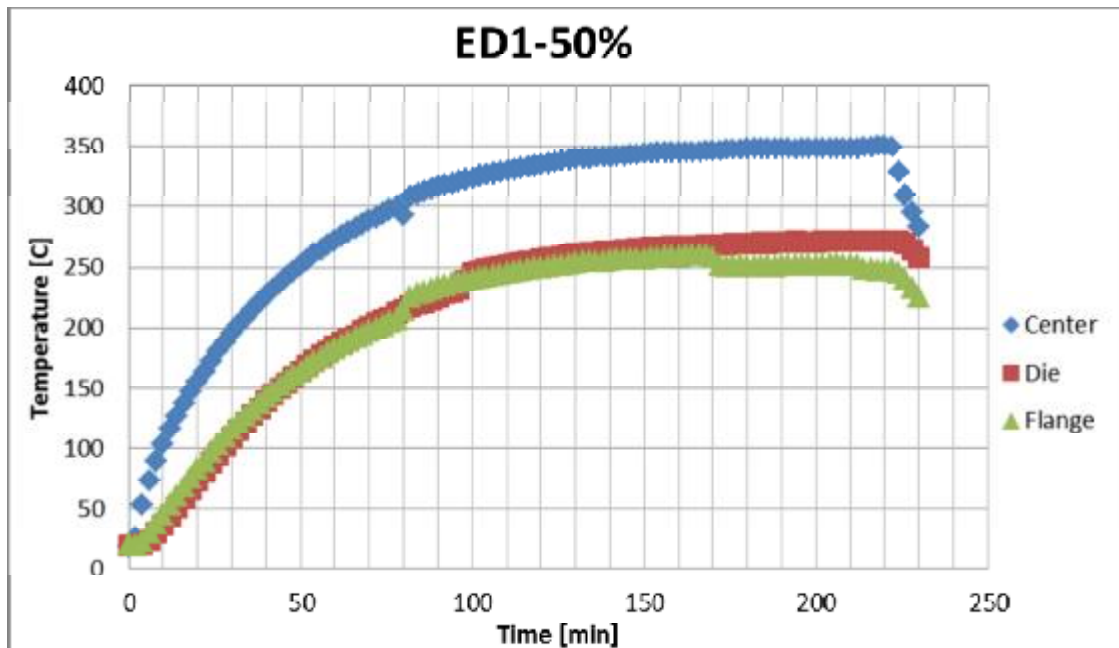


Εικόνα 4.36: Πειραματική διάταξη μέτρησης θερμοκρασίας με συσκευή rico logger και το ανάλογο λογισμικό

4.7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ(ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΚΟ ΠΡΟΦΙΛ ΘΑΛΑΜΟΥ ΕΞΩΘΗΣΗΣ)

Το γράφημα που ακολουθεί δείχνει τη μεταβολή του θερμοκρασιακού προφίλ στο εσωτερικό του θαλάμου εξώθησης. Οι μετρήσεις έγιναν με ποσοστό χρήσης της

αντίστασης στο 50% καθώς μεγαλύτερο ποσοστό δημιουργούσε τόσο υψηλές θερμοκρασίες που έκαιγε την υαλοκουβέρτα.



Εικόνα 4.37: Μεταβολή θερμοκρασίας θαλάμου εξώθησης με χρήση της αντίστασης 50%

Τα συμπεράσματα που βγαίνουν από τη συνάρτηση θερμοκρασίας είναι ότι: Η μέγιστη θερμοκρασία φτάνει τους 350 οC που σημαίνει πως δίνεται η δυνατότητα τήξης των περισσότερων θερμοπλαστικών, ενώ με τη βελτίωση της μόνωσης και τη μεγαλύτερη χρήση της αντίστασης υπάρχει θεωρητικά δυνατότητα τήξης όλων των θερμοπλαστικών. Υπάρχει θερμοκρασιακή διαφορά περίπου 100 οC μεταξύ κέντρου του θαλάμου με τα άκρα του. Η σταθερά χρόνου (τ) του συστήματος που αντιστοιχεί στο 63,2% της μεταβολής της θερμοκρασίας είναι περίπου 35 λεπτά ενώ ο χρόνος απόκρισης του (t) για το 90% της μεταβολής είναι 140 λεπτά.

4.8 ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ ΚΙΝΗΤΗΡΑ ΥΨΗΛΗΣ ΡΟΠΗΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΜΟΛΟΓΗΣΗΣ

Στη συνέχεια ακολούθησε έρευνα για νέο κατάλληλο κινητήρα υψηλής ροπής και βελτίωση της συναρμολόγησης όπως για παράδειγμα, με σκοπό την καλύτερη ευθυγράμμιση του τρυπανιού στους θαλάμους καθώς και την ελαχιστοποίηση των τριβών του. Συγκεκριμένα, το feed barrel που λειτουργεί και ως η βάση του εξωθητή, χρειάστηκε μια επεξεργασία και κατεργασία ώστε να οδηγεί με καλύτερο τρόπο το τρυπάνι. Δύο έδρανα κύλισης(ρουλεμάν) τοποθετήθηκαν στο πίσω μέρος της βάσης όπως δείχνει και η παρακάτω εικόνα. Για την σταθεροποίηση τους από αξονικές δυνάμεις πίσω από τα έδρανα υπάρχει μια ασφάλεια για ρουλεμάν.



Εικόνα 4.38: Feed barrel με συνδεδεμένο τρυπάνι και έδρανα κυλίσεως

Η αναζήτηση κινητήρα οδήγησε στη έβρεση ενός κινητήρα παραθύρων αυτοκινήτου τάσης 12 V dc. Οι κινητήρες τέτοιου τύπου έχουν πολύ υψηλή ροπή και το μόνο που χρειάζονται για να λειτουργήσουν είναι ένας μετασχηματιστής ρεύματος από ρεύμα γραμμής ΔΕΗ 230 ac σε 12 V dc. Ο συγκεκριμένος κινητήρας λειτουργεί στις 65 rpm και παρεμβάλλοντας ένα μειωτήρα στροφών 5:1 λειτουργεί στις 12 rpm περίπου και βελτιώνει περαιτέρω τη ροπή του. Περισσότερα χαρακτηριστικά του μοτέρ αυτού δεν είναι διαθέσιμα από τον κατασκευαστή.

Ένα ακόμη ζήτημα που χρειάστηκε επίλυση ήταν η μόνωση μεταξύ extruder barrel και feed barrel. Η μόνωση στο σημείο αυτό είναι απαραίτητη διότι λόγω του μικρού μήκους του εξωθητή, η θερμοκρασιακή διαφορά μεταξύ των ζωνών του θα ήταν τόσο μικρή όπου το πολυμερές θα έλιωνε με την είσοδο του στο θάλαμο τροφοδοσίας, ή στη περίπτωση της παρούσας πρότυπης συναρμολόγησης του extruder, η μη ύπαρξη μόνωσης θα οδηγούσε στην αστοχία της βάσης (feed barrel) που όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, είναι φτιαγμένη από πλαστικό ABS με θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης κοντά στους 105 °C καθώς είναι άμορφο.

Για τη μόνωση που κατασκευάστηκε σε μηχανουργείο επιλέχθηκε High Pressure Laminate (επιφανειακές στρώσεις υψηλής πίεσης) ή αλλιώς HPL. Το HPL αποτελείται από στρώματα χαρτιού τα οποία κολλούνται με βακελίτη (φαινολική ρητίνη φορμαλδεΐδης). Τα φύλλα χαρτιού ποτίζονται με τη ρητίνη και περνούν σε πρέσα προκειμένου να συμπιεστούν σε πίεση 80 με 130 atm και παράλληλα θερμαίνονται σε θερμοκρασίες έως 140 °C. Ο βακελίτης πήρε το όνομα του από τον Βέλγο χημικό Leo Baekeland όπου το ανακάλυψε στη Νέα Υόρκη το 1907. Ο βακελίτης χρησιμοποιείται ευρύτατα στη διακόσμηση και την επίπλωση καθώς έχει ιδιότητες σαν:

- Αντοχή σε τριβή και γρατζουνιές
- Ανθεκτικότητα στη δημιουργία βακτηριδίων και μικροοργανισμών
- Αντοχή σε υψηλές και χαμηλές θερμοκρασίες
- Αντοχή σε καθαριστικά και απολυμαντικά (χημική σταθερότητα) αλλά
- Δεν αντέχει το νερό, στα σημεία των ενώσεων του και για αυτό τον λόγο χρειάζεται πολύ καλή μόνωση

Όπως είναι φανερό, ο βακελίτης είναι κατάλληλη επιλογή για μόνωση καθώς επίσης δεν λιώνει. Επίσης, στην εσωτερική διάμετρο της μόνωσης τοποθετήθηκε ένα έδρανο ολίσθησης (κουζινέτο) για μείωση των τριβών μεταξύ μόνωσης και τρυπανιού.



Εικόνα 4.39: Κατεργασία βακελίτη σε φρέζα



Εικόνα 4.40: Μόνωση βακελίτη με προσαρμοσμένο έδρανο ολίσθησης



Εικόνα 4.41: Διάταξη εξωθητή με τον κινητήρα, τον μειωτήρα στροφών και τον μετασχηματιστή ρεύματος

Μετά από αυτό το δεύτερο στάδιο συναρμολόγησης, η διάταξη είναι έτοιμη για τη διεξαγωγή του πρώτου πειράματος τήξης πλαστικού.

4.9 Πρώτη δοκιμή εξώθησης πλαστικού

Για τη πρώτη απόπειρα τήξης πλαστικού χρησιμοποιήθηκε LDPE (χαμηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο) που έχει θερμοκρασία τήξης κοντά στους 120°C. Με σκοπό να βεβαιωθεί η επιτυχής τήξη του πολυμερούς ο εξωθητής ρυθμίστηκε στο 50% της ισχύς του που σημαίνει πως στο εσωτερικό τοίχωμα του η θερμοκρασία θα έφτανε έως τους 350°C. Αποτέλεσμα είχε το πλαστικό να αποκτήσει πολύ μικρό ιξώδες και να εξωθείται μαλακότερο από όσο χρειάζεται για την παραγωγή νήματος. Το νήμα είναι πολύ εύπλαστο στην έξοδο του από το ακροφύσιο και δίνει τη δυνατότητα μεταβολής της διαμέτρου του όταν τραβηχτεί. Για τη ψύξη του χρησιμοποιήθηκε μικρός ανεμιστήρας.



Εικόνα 4.42: Πειραματική διάταξη εξώθησης πολυμερούς LDPE



Εικόνα 4.43: Εξώθηση LDPE

Μπορεί το πείραμα σε γενικές γραμμές να ήταν επιτυχές αλλά είχε και κάποια άσχημα αποτελέσματα. Ένα από αυτά είναι η αστοχία της βάσης της συσκευής (feed barrel) λόγω της υψηλής θερμοκρασίας και άλλο η αλλοίωση ενός μέρους του πολυμερούς που προσκόλλησε στο τρυπάνι. Τα εν λόγω αποτελέσματα φαίνονται στις παρακάτω εικόνες.

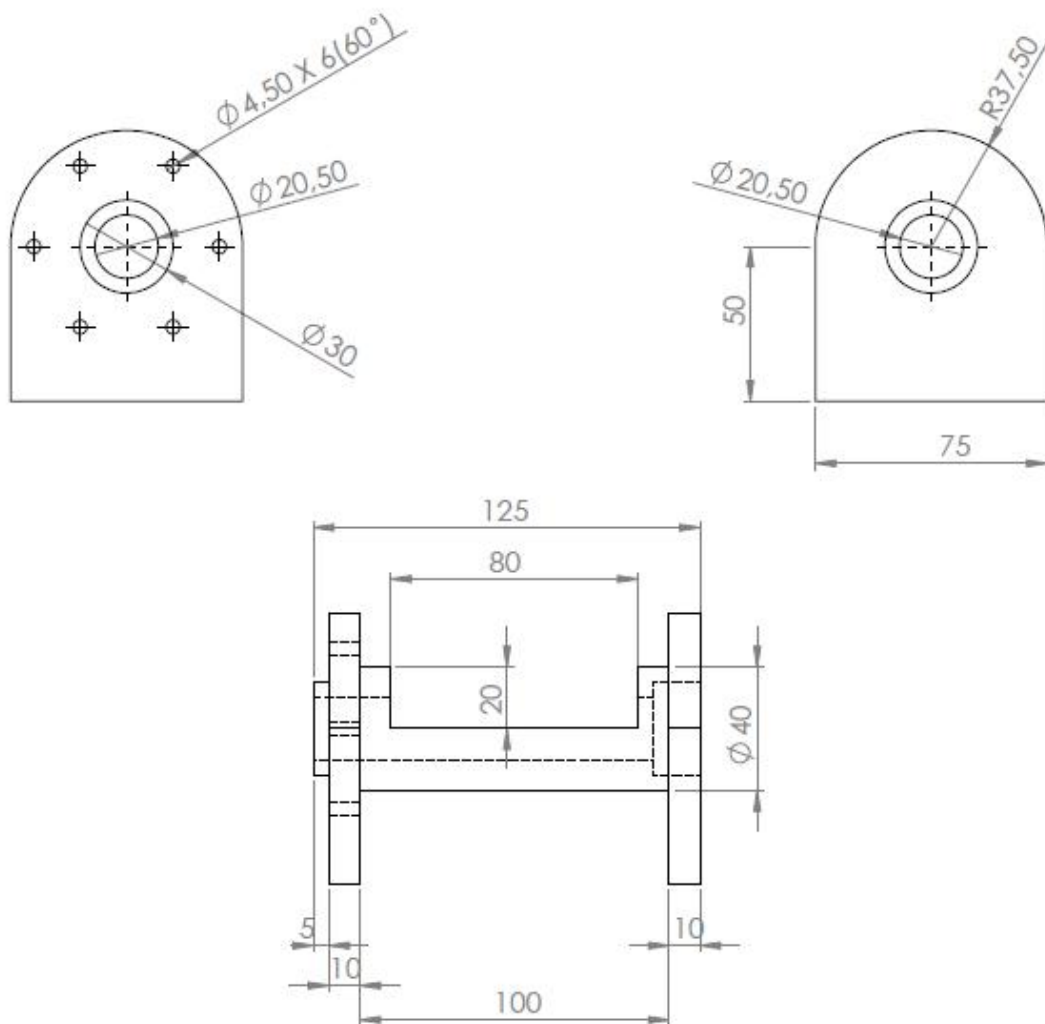


Εικόνα 4.44: Αστοχία πλαστικής (ABS) βάσης



Εικόνα 4.45: Τρυπάνι εξωθητή μετά το πείραμα τήξης

Ένα επιπλέον συμπέρασμα που βγήκε από το πείραμα είναι ότι η συσκευή λόγω πήξης του υλικού μετά το τέλος της παραγωγής νήματος κολλάει και δεν μπορεί να αποσυναρμολογηθεί. Για το λόγο αυτό οποιαδήποτε αποσυναρμολόγηση πρέπει να γίνει σε υψηλή θερμοκρασία (δηλαδή το υλικό στο εσωτερικό να βρίσκεται σε θερμοκρασία τήξης). Επίσης επειδή ένα μέρος του υλικού παραμένει στο εσωτερικό της συσκευής, πρέπει τα πρώτα λίγα εκατοστά του επομένου νήματος να κόβονται. Η αστοχία του πλαστικού feed barrel φέρνει την ανάγκη για αντικατάσταση του με μεταλλικό. Το μηχανολογικό σχέδιο αυτού βρίσκεται παρακάτω.



Εικόνα 4.46: Μηχανολογικό σχέδιο μεταλλικού θαλάμου τροφοδοσίας

4.10 Τελική συναρμολόγηση και σχέδιο εξωθητή

Η τελική συναρμολόγηση προβλέπει τη πλήρη λειτουργικότητα του εξωθητή καθώς και ένα ολοκληρωμένο αυτόνομο ηλεκτρολογικό κύκλωμα το οποίο θα δίνει πλήρη έλεγχο της συσκευής. Μετά την αλλαγή του πλαστικού feed barrel σε μεταλλικό, δημιουργήθηκε κατάλληλο ηλεκτρικό κύκλωμα για τον παράλληλο έλεγχο

του μοτέρ και των δύο ανεμιστήρων με διακόπτες. Οι διακόπτες και τα καλώδια οργανώθηκαν σε κατάλληλα κουτιά. Τα εξαρτήματα συνδέθηκαν παράλληλα με σκοπό να υπάρχει ανεξάρτητος έλεγχος του καθενός. Από τη στιγμή που το μοτέρ και οι δύο ανεμιστήρες τροφοδοτούνται από την ίδια πηγή, κρίνεται απαραίτητη η μελέτη του κυκλώματος για τυχόν σημαντική πτώση της ισχύος του κινητήρα. Οι μετρήσεις έγιναν με πολύμετρο για τέσσερις πιθανούς συνδυασμούς και η ισχύς υπολογίστηκε από τον τύπο :

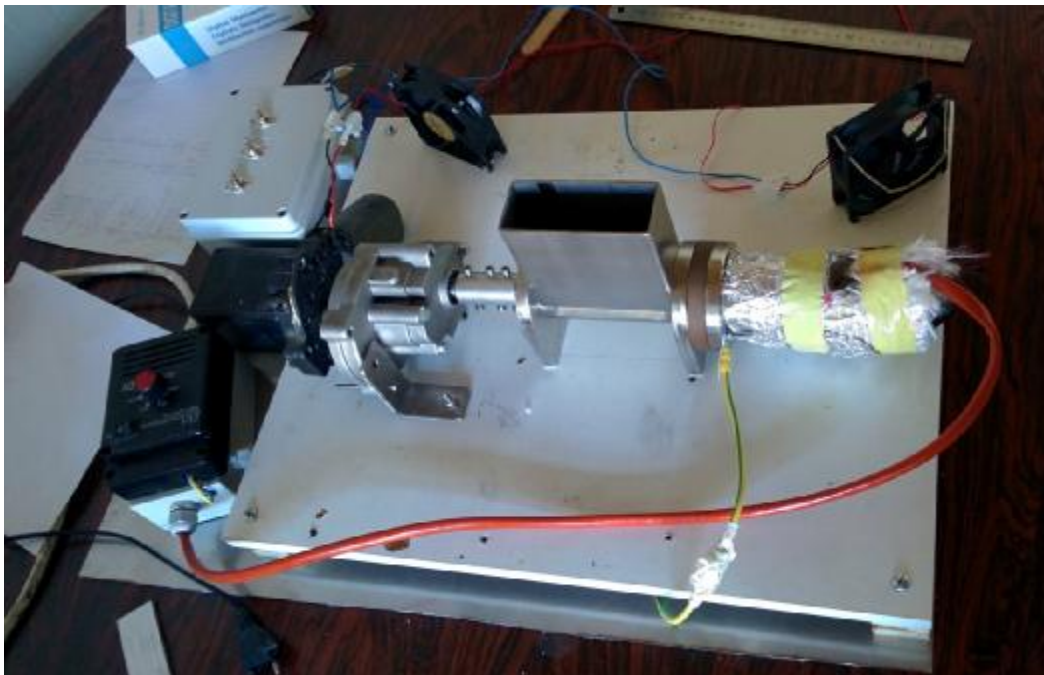
$$P = V * I [W] \quad (4.3)$$

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα:

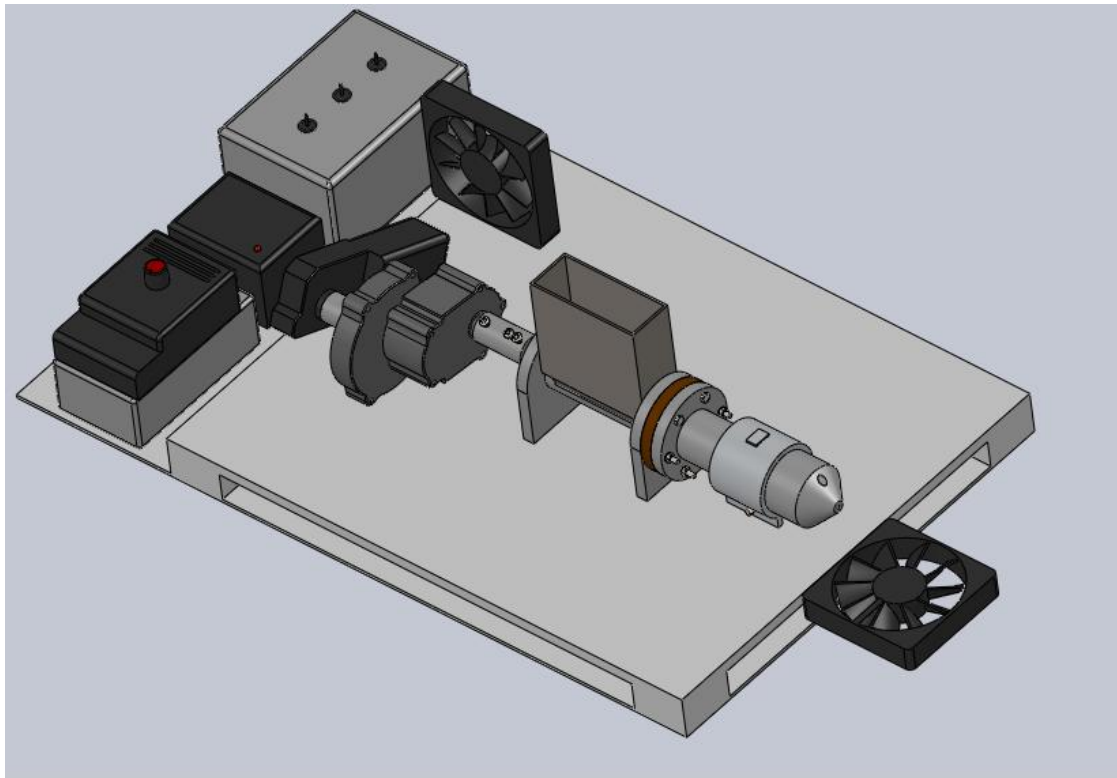
Πίνακας 4.8: Αποτελέσματα μετρήσεων κυκλώματος για διαφορετικούς συνδυασμούς λειτουργίας

Μοτέρ	Ανεμ. μοτέρ	Ανεμ. νήματος	Τάση[V]	Ένταση[A]	Ισχύς[W]
x			11,0	0,845	9,295
x	x		10,2	0,800	8,160
x	x	x	10,1	0,790	7,979
x		x	10,8	0,881	0,881

Από τα αποτελέσματα βρέθηκε πως όταν λειτουργούν όλα εξαρτήματα, υπάρχει πτώση 14,16% στην ισχύ του κινητήρα ενώ όταν είναι ανοιχτός μόνο ο ανεμιστήρας του μοτέρ η πτώση είναι 12,21%. Έτσι συμπεραίνεται πως αυτό το ανεμιστηράκι είναι υπεύθυνο για τη πτώση της ισχύος του κινητήρα. Τέλος, σειρά έχει η τελική σχεδίαση του εξωθητή ώστε να αρχίσει η βελτιστοποίηση του και η μελέτη συμπεριφοράς καθαρών και ενισχυμένων θερμοπλαστικών κατά την εξώθηση.



Εικόνα 4.47: Τελική συναρμολόγηση εξωθητή



Εικόνα 4.48: Τελικό σχέδιο εξωθητή μετά τις απαραίτητες αλλαγές της συναρμολόγησης

5 ΕΞΩΘΗΣΗ ΚΑΘΑΡΩΝ ΚΑΙ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΘΕΡΜΟ-ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΜΕ CNTs, ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑΣ

5.1 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΑ ΘΕΡΜΟΠΛΑΣΤΙΚΑ

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η βελτιστοποίηση της τελικής συναρμολόγησης του εξωθητή με σκοπό να γίνουν γνωστά τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του (π.χ. ρυθμός εξώθησης) και εξετάζεται η συμπεριφορά καθαρών και ενισχυμένων θερμοπλαστικών με νανοσωλήνες άνθρακα.

Για τη πειραματική μελέτη της εργασίας χρησιμοποιήθηκαν καθαρά πλαστικά και ενισχυμένα με διαφορετικές περιεκτικότητες σε νανοσωλήνες άνθρακα με σκοπό να διαπιστωθούν τυχόν αλλαγές στη συμπεριφορά τους.

Στα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν περιλαμβάνονται δύο καθαρά και τέσσερα ενισχυμένα υλικά. Τα καθαρά είναι ένα συν-πολυμερές πολυαμιδίου (Nylon), βασισμένο στο νάιλον 66 και ένα χαμηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο. Τα ενισχυμένα είναι ένα χαμηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο με 20% κατά βάρος περιεκτικότητα σε CNTs, συν-πολυμερές πολυαμιδίου βασισμένο στο νάιλον 66, ένα με 7% και ένα με 10% περιεκτικότητα και Nylon 12 με 15% CNT. Τα εν λόγω θερμοπλαστικά καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 5.1: Υλικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη πειραματική διαδικασία

ΥΛΙΚΟ	T _m [oC]	ΧΡΩΜΑ
Custom PA copolymer neat	~130	Διαφανές
Custom PA copolymer 10%	~130	Μαύρο
custom PA copolymer 7%	~130	Μαύρο
LDPE	120	Λευκό
PA 1502	179	Μαύρο
LDPE 2001	120	Μαύρο

5.2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ

Κατά τη πειραματική διαδικασία χρησιμοποιήθηκαν όλα τα υλικά που προαναφέρθηκαν όσες φορές κρίθηκε απαραίτητο δηλαδή μέχρις ότου το αποτέλεσμα της εξώθησης ήταν ικανοποιητικό. Τα κριτήρια για να θεωρηθεί ικανοποιητικό το νήμα που παράγεται είναι η επιφάνεια του εξωθούμενου υλικού καθώς και η διακύμανση της διατομής του. Η επιφάνεια του νήματος πρέπει να είναι λεία και η διατομή δεν πρέπει να έχει μεγάλες αποκλίσεις από τη μέση, που πρέπει να είναι κοντά στα 3 mm (διάμετρος ακροφυσίου). Η παράμετρος η οποία μεταβάλλεται από πείραμα σε πείραμα είναι μόνο η θερμοκρασία. Το κάθε υλικό δοκιμάζεται σε κάποιες θερμοκρασίες και παρατηρείται κατά την έξοδο του αν έχει την κατάλληλη επιφάνεια και διατομή. Βάσει αυτών των παρατηρήσεων κρίνεται το αν είναι κατάλληλο για εξώθηση νήματος ή όχι. Τέλος, υπολογίζεται ο μαζικός ρυθμός εξώθησης υλικού ζυγίζοντας το νήμα και διαιρώντας το με το χρόνο που χρειάστηκε για να παραχθεί.

Κατά τη διάρκεια των πειραμάτων παρατηρήθηκε πως όλα τα υλικά Custom PA copolymer δημιουργούσαν φυσαλίδες κατευθείαν μετά την έξοδο τους από το ακροφύσιο. Το υλικό έμοιαζε να έχει καλή επιφάνεια αλλά σχεδόν αμέσως φούσκωνε σε κάποια τυχαία σημεία της επιφάνειάς του. Αυτό όπως φάνηκε ήταν φαινόμενο υγρασίας η οποία αποφεύχθηκε με αφύγρανση των κόκκων του υλικού σε φούρνο, στους 60°C για 4 ώρες. Η υγρασία εξατμιζόταν στο θάλαμο εξώθησης και εγκλωβιζόταν στη μάζα του υλικού σε σχετικά υψηλή πίεση ενώ κατά την έξοδο του λόγω υποπίεσης ο αέρας εκτονωνόταν και δημιουργούσε φυσαλίδες στην επιφάνεια του νήματος. Στον παρακάτω πίνακα βρίσκονται τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας.

Πίνακας 5.2: Αποτελέσματα μετρήσεων εξώθησης

ΥΛΙΚΟ	T _m [oC]	ED-1 [%]	T _{die} [oC]	ΕΞΩΘ/ΝΟ ΒΑΡΟΣ[g]	ΧΡΟΝΟΣ ΕΞΩΘ.[min]	ΡΥΘΜΟΣ ΕΞΩΘ. [g/min]
LDPE 2001	120	25	230	8,2	5	1,64
LDPE 2001	120	15	190	9,1	5	1,82
LDPE	120	25	230	22,3	15	1,49
LDPE	120	15	190	ΔΕΝ ΕΞΩΘΗΤΑΙ ΛΟΓΩ ΜΗ ΤΗΞΗΣ		
Custom PA Copolymer (neat)	~130	50	310	ΠΟΛΥ ΡΕΥΣΤΟ.ΔΥΣΚΟΛΕΥΕΙ ΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ		
Custom PA Copolymer (neat)	~130	25	230	9,0	5	1,8

ΥΛΙΚΟ	T _m [°C]	ED-1 [%]	T _{die} [°C]	ΕΞΩΘ/ΝΟ ΒΑΡΟΣ[g]	ΧΡΟΝΟΣ ΕΞΩΘ.[min]	ΡΥΘΜΟΣ ΕΞΩΘ. [g/min]
Custom PA Copolymer (neat)	~130	10	170	ΔΕΝ ΕΞΩΘΗΤΑΙ ΛΟΓΩ ΜΗ ΤΗΞΗΣ		
Custom PA Copolymer (neat)	~130	15	190	5,2	5	1,04
Custom PA Copolymer 7% CNT	~130	25	230	4,4	5	0,88
Custom PA Copolymer 7% CNT (με αφύγρανση)	~130	40	270	8,4	5	1,68
Custom PA Copolymer 10% CNT (με αφύγρανση)	~130	25	230	4,4	5	0,88
PA 1502	179	25	230	0,8	2	0,4



Εικόνα 5.1: Νήμα Custom PA Copolymer 7% CNT με φυσαλίδες κατά την έξοδο του από τον εξωθητή

Από τον πίνακα φαίνεται ότι ο ρυθμός εξώθησης είναι κοντά στο 1,6[g/min], ρυθμός που φυσικά εξαρτάται από τη πυκνότητα του υλικού και από τη κατάσταση την οποία βρίσκεται ο εξωθητής εσωτερικά. Η κατάσταση του εξωθητή εξαρτάται από το αν έχουν δημιουργηθεί συσσωματώματα υλικού που έχουν κολλήσει στο τρυπάνι ή το ακροφύσιο της μηχανής και εμποδίζει τη ροή της ρητίνης. Στη περίπτωση αυτή επιβάλλεται η λύση και ο καθαρισμός των εξαρτημάτων πριν την επόμενη χρήση. Στον επόμενο πίνακα βρίσκονται ορισμένα σημαντικά μεγέθη τα οποία

υπολογίστηκαν θεωρητικά και που αφορούν την εξώθηση. Επίσης καταγράφεται για την εκάστωτε περίπτωση το αν το υλικό είναι κατάλληλο για την παραγωγή νήματος ή όχι βάσει των κριτηρίων που αναφέρθηκαν σε προηγούμενη παράγραφο. Ο ογκομετρικός ρυθμός εξώθησης υπολογίστηκε μέσω της πυκνότητας η οποία δεν ήταν για όλα τα υλικά γνωστή ενώ η ταχύτητα εξώθησης υπολογίστηκε μέσω της διατομής, μετατρέποντας τον όγκο σε μήκος.

Πίνακας 5.3: Μετατροπή ρυθμού εξώθησης σε ογκομετρικό ρυθμό και γραμμική ταχύτητα εξώθησης με έλεγχο συμβατότητας του υλικού για παραγωγή νήματος

ΥΛΙΚΟ	ED-1 [%]	ΟΓΚΟΜΕΤΡΙΚΟΣ ΡΥΘΜΟΣ ΕΞΩΘ. [m ³ /min]	ΤΑΧ/ΤΑ ΕΞΩΘ. ΓΙΑ d=3mm [cm/min]	ΚΑΤΑΛΛΗΛΟ ΓΙΑ ΕΞΩΘ. ΝΗΜΑΤΟΣ
LDPE 2001	25	1,76*10 ⁻⁶	25	ΝΑΙ
LDPE 2001	15	1,96*10 ⁻⁶	27,7	ΝΑΙ
LDPE	25	1,64*10 ⁻⁶	23,2	ΝΑΙ*
LDPE	15	ΔΕΝ ΕΞΩΘΗΤΑΙ ΛΟΓΩ ΜΗ ΤΗΞΗΣ		ΟΧΙ
Custom PA Copolymer (neat)	50	ΠΟΛΥ ΡΕΥΣΤΟ. ΔΥΣΚΟΛΕΥΕΙ ΤΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ		ΟΧΙ
Custom PA Copolymer (neat)	25	ΑΓΝΩΣΤΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ		ΟΧΙ
Custom PA Copolymer (neat)	10	ΔΕΝ ΕΞΩΘΗΤΑΙ ΛΟΓΩ ΜΗ ΤΗΞΗΣ		ΟΧΙ
Custom PA Copolymer (neat)	15	ΑΓΝΩΣΤΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ		ΟΧΙ
Custom PA Copolymer 7% CNT	25	ΑΓΝΩΣΤΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ		ΟΧΙ

Custom PA Copolymer 7% CNT (με αφύγρανση)	40	ΑΓΝΩΣΤΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ		ΝΑΙ
Custom PA Copolymer 10% CNT (με αφύγρανση)	25	ΑΓΝΩΣΤΗ ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ		ΝΑΙ
PA 1502	25	3,6*10 ⁻⁷	5,1	ΝΑΙ

* Για την εξώθηση νήματος με σταθερή διατομή απαιτείται η χρήση αυτοματισμού τύλιξης με καρούλι



Εικόνα 5.2: Πείραμα εξώθησης Custom PA Copolymer 7% CNT

Τα πρώτα συμπεράσματα του παραπάνω πίνακα είναι πως η ταχύτητα εξώθησης νήματος 3 χιλιοστών είναι περίπου 25 cm/min με σχετικά μικρές διακυμάνσεις και ότι τα καθαρά πλαστικά (χωρίς CNT) χρειάζονται σύστημα αυτόματης τύλιξης με σκοπό να κρατήσουν σταθερή διατομή. Τα ενισχυμένα θερμοπλαστικά είχαν πολύ καλή διατομή και λείες επιφάνειες. Για καλύτερο έλεγχο του νήματος χρησιμοποιήθηκε ένα εξάρτημα «οδηγός» το οποίο σχεδιάστηκε και τυπώθηκε σε 3D εκτυπωτή και ενσωματώθηκε στη συναρμολόγηση.



Εικόνα 5.3: Παραγόμενο νήμα PA1502 και LDPE2001

Όπως φάνηκε από τα πειράματα, τα καταλληλότερα υλικά για να δοκιμαστούν στον 3D εκτυπωτή είναι τα υλικά με ενσωματωμένους νανοσωλήνες άνθρακα.

6 ΧΡΗΣΗ ΠΑΡΑΓΩΜΕΝΟΥ ΝΗΜΑΤΟΣ ΣΕ 3D ΕΚΤΥΠΩΤΗ

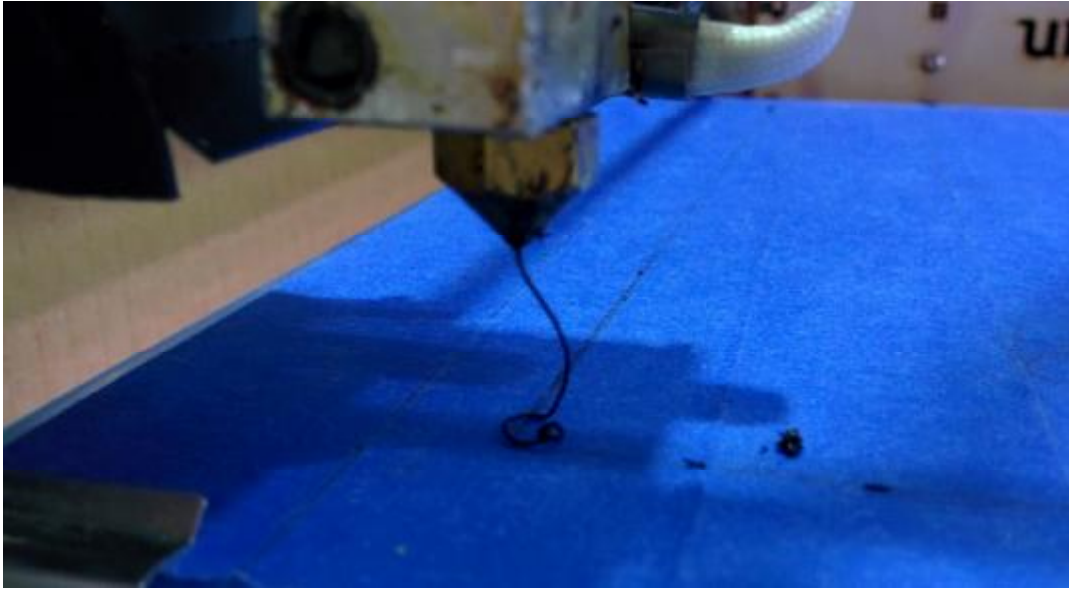
Για τη δοκιμή του παραγόμενου νήματος χρησιμοποιήθηκε ένας μικρός εκτυπωτής γραφείου που είναι φτιαγμένος να χρησιμοποιείται κυρίως με τα υλικά PLA και ABS. Παρόλα αυτά το λογισμικό του εκτυπωτή δίνει τη δυνατότητα ελέγχου πολλών παραμέτρων με σκοπό την έβρεση τους για κάθε διαθέσιμο θερμοπλαστικό. Είναι σημαντικό να σημειωθεί πως δεν είναι όλα τα θερμοπλαστικά κατάλληλα για τρισδιάστατη εκτύπωση καθώς το υλικό πρέπει να έχει κάποια χαρακτηριστικά για τη σωστή συμπεριφορά του. Το νήμα από τον εξωθητή που θα χρησιμοποιηθεί πρέπει να έχει την επιθυμητή διάμετρο αλλά και όσο το δυνατόν μικρή απόκλιση αυτής.

Το υλικό που πληρεί τις προϋποθέσεις με τον καλύτερο τρόπο είναι το LDPE2001. Με μέση διάμετρο 2,91 mm και τυπική απόκλιση 0,03 mm δείχνει ιδανικό για δοκιμή. Η διαδικασία προχώρησε και το νήμα τοποθετήθηκε στον 3D printer χωρίς επιπλοκές. Σαν επόμενο βήμα ρυθμίστηκαν οι παράμετροι του εκτυπωτή. Οι σημαντικότερες είναι η θερμοκρασία του ακροφυσίου και η θερμοκρασία του «κρεβατιού» στο οποίο αφήνεται το πλαστικό. Γνωρίζοντας ότι το σημείο τήξης του πολυαιθυλενίου είναι περίπου 120°C, η θερμοκρασία ακροφυσίου ρυθμίστηκε 60°C πάνω από αυτή ώστε να έχει αρκετά χαμηλό ιξώδες.

Κατά τη διαδικασία εκτύπωσης παρατηρήθηκε πως το υλικό δεν εξερχόταν από το ακροφύσιο ακόμα και αν αυξανόταν περαιτέρω η θερμοκρασία του. Αποδείχθηκε τελικώς πως το LDPE2001, λόγω της υψηλής (20%) περιεκτικότητας σε νανοσωλήνες άνθρακα, είχε πολύ υψηλό ιξώδες ώστε να εξέλθει από το ακροφύσιο των 0,4 mm. Επίσης παρατηρήθηκε ότι όταν η παροχή του νήματος γινόταν χειροκίνητα, δηλαδή το νήμα σπρωχνόταν με το χέρι στο ακροφύσιο, ήθελε πολύ δύναμη για να εξέλθει από αυτό και το σύστημα τροφοδοσίας του εκτυπωτή δεν είχε αυτή τη δυνατότητα.

Γνωρίζοντας πλέον ότι τα υψηλά ποσοστά περιεκτικότητας σε CNTs καθιστούν τα θερμοπλαστικά ακατάλληλα για εκτύπωση, σειρά έπρεπε να έχει ένα υλικό με όσο το δυνατόν χαμηλότερη περιεκτικότητα σε CNTs και αρκετά καλή διάμετρο νήματος. Το νήμα που πληρεί αυτές τις προϋποθέσεις είναι το Custom PA Copolymer 7% CNT όπου μετά την αφύγρανση των κόκκων του δημιουργεί πολύ καλή επιφάνεια νήματος. Η μέση διάμετρος του είναι 3,09 mm, σαφώς μεγαλύτερη του προηγούμενου, και τυπική απόκλιση 0,05mm, που θεωρείται αρκετά μεγάλη.

Το συγκεκριμένο νήμα ακολουθώντας την ίδια λογική ρύθμισης παραμέτρων έδειξε πολύ καλύτερη συμπεριφορά και εξερχόταν ιδανικά από το ακροφύσιο. Ωστόσο τα προβλήματα δεν έλειψαν καθώς η ύπαρξη νανοσωλήνων άνθρακα μειώνει τη δυνατότητα του υλικού να κολλάει στις επιφάνειες (tackiness), πρόβλημα που ίσως διορθώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας του επιπέδου εκτύπωσης. Η επιτυχής εκτύπωση με το παρόν υλικό μοιάζει δυνατή εντούτοις λόγω έλλειψης χρόνου δεν επιτεύχθηκε.



Εικόνα 6.1: Εκτύπωση Custom PA Copolymer 7% CNT

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΒΕΛΤΙΩΣΗ

Τα συμπεράσματα που λήφθηκαν από την εργασία αυτή αφορούν τους εξωθητές και τη βελτίωση της διαδικασίας εξώθησης καθώς και τις αλλαγές που επιφέρουν οι νανοσωλήνες άνθρακα στα θερμοπλαστικά και στη συμπεριφορά τους. Επίσης αναφέρονται τα συμπεράσματα που βγήκαν κατά τη χρήση των παραχθέντων νημάτων σε 3D εκτυπωτή.

Όσο αναφορά τη διαδικασία της εξώθησης παρατηρήθηκε πως από τη στιγμή που χρησιμοποιούνται υλικά περιεκτικότητας σε CNTs, το εσωτερικό του θαλάμου εξώθησης και ο κοχλίας μαυρίζουν και περνούν το χρώμα αυτό σε οποιοδήποτε πλαστικό χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια. Για το λόγο αυτό πρέπει ο εξωθητής να καθαρίζεται συχνά εσωτερικά ή να υπάρχουν ανταλλακτικά εξαρτήματα (κοχλίας και θάλαμος εξώθησης) τα οποία θα αλλάζουν ανάλογα με τη ρητίνη που χρησιμοποιείται. Επιπλέον, για την εξώθηση νήματος από καθαρά (δίχως ενίσχυση) θερμοπλαστικά, κρίνεται απαραίτητη η ύπαρξη αυτοματισμού τύλιξης αυτού με στόχο τη σταθερότητα της διατομής του. Σημαντικό επίσης είναι πριν τη χρήση των κόκκων αυτές να αφυγρύνονται σε θερμοκρασίες από 60 έως 80 °C για περίπου 2 με 4 ώρες. Με αυτό τον τρόπο αποφεύγονται οι φυσαλίδες στο τελικό προϊόν. Επιπροσθέτως, αποδεικνύεται πως για τη παραγωγή νήματος διαφορετικής διαμέτρου δεν χρειάζεται η αλλαγή ακροφυσίου αλλά αρκεί το γρηγορότερο «τράβηγμα» του νήματος από τον αυτοματισμό τύλιξης κατά την έξοδο του από το ακροφύσιο. Με αυτό το τρόπο επιτυγχάνονται μικρότερες διαμέτροι νήματος χωρίς ιδιαίτερες αλλαγές. Επίσης παρατηρήθηκε πως το κάθε υλικό, με την ύπαρξη ίδιων παραμέτρων, είχε διαφορετική διάμετρο κατά την έξοδο του από τον εξωθητή. Αυτή η διαφορά οφείλεται στη διαστολή που έχει η μάζα του πολυμερούς κατά την υποπίεση που επιδρά πάνω του όταν βγαίνει από το ακροφύσιο του μηχανήματος. Σαν συμπέρασμα επιβάλλεται η ρύθμιση διαφορετικής ταχύτητας τύλιξης του νήματος για κάθε ρητίνη χωριστά, με σκοπό την επίτευξη της επιθυμητής διαμέτρου νήματος. Άλλο ένα σημαντικό συμπέρασμα είναι η αναγκαία γρήγορη ψύξη του νήματος. Η ρητίνη κατά την έξοδο της είναι αρκετά ρευστή και επιβάλλεται η γρήγορη ψύξη της για να κρατήσει το επιθυμητό σχήμα και να μην ρεύσει είτε σχηματίζει καμπυλότητες κατά την έξοδο από το ακροφύσιο.

Όσο αναφορά την ύπαρξη CNTs στη μάζα θερμοπλαστικών τα συμπεράσματα που βγήκαν είναι τα εξής:

1. Αύξηση θερμικής αγωγιμότητας (λιώνουν ταχύτερα οι κόκκοι)
2. Αύξηση ηλεκτρικής αγωγιμότητας[14]
3. Αύξηση του ιξώδους της ρητίνης
4. Βελτίωση επιφάνειας νήματος κατά την εξώθηση
5. Αύξηση του συντελεστή διαστολής και του ρυθμού αύξησης του με τη θερμοκρασία. Οφείλεται στην υψηλή κινητικότητα των CNTs (phonon vibrations) μέσα σε ένα μη χρησιμοποιούμενο χώρο από τις μακρομοριακές αλυσίδες.

6. Αύξηση της T_g . Οι νανοσωλήνες άνθρακα τείνουν να επιβραδύνουν τη κινητικότητα (ολίσθηση) των μακρομοριακών αλυσίδων και έτσι το υλικό απαιτεί μεγαλύτερα ποσά θερμότητας για να φτάσει την T_g .
7. Αυξάνει τη πυκνότητα του υλικού.
8. Αύξηση του μέτρου ελαστικότητας του Young. Αύξηση ψαθυρότητας.
9. Αύξηση της ενέργειας κρούσης. Οι δεσμοί Van Der Waal's αυξάνονται με την ύπαρξη CNTs στο πολυμερές.

Από τη χρήση του ενισχυμένου νήματος στον 3D εκτυπωτή βγήκε το συμπέρασμα πως πλαστικά με υψηλή περιεκτικότητα σε CNTs είναι ακατάλληλα για εκτύπωση λόγω του υψηλού ιξώδους τους. Επίσης με τη συνεχή χρήση ενισχυμένων πλαστικών όπως και στον εξωθητή, το ακροφύσιο κρατάει CNTs εσωτερικά και μαυρίζει τα επόμενα πλαστικά και μπουκώνουν των εκτυπωτή. Το πρόβλημα αυτό επιδέχεται την ίδια λύση με τον εξωθητή. Τέλος, η ύπαρξη CNTs μειώνει το *tackiness* της ρητίνης με αποτέλεσμα να δυσκολεύει τη προσκόλληση της με το «κρεβάτι» του εκτυπωτή.

Προτάσεις για βελτίωση:

1. Μηχανισμός τύλιξης νήματος
2. Αυτοματισμός ελέγχου θερμοκρασίας (PID controller)
3. Μοτέρ μεταβαλλόμενης ταχύτητας

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Richardson T., Lokensgard E., ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΠΛΑΣΤΙΚΑ, Εκδόσεις ΙΩΝ, 1997, ISBN 960-411-367-4
2. How to Get Peak Performance & Efficiency Out of Your Extrusion Line, Chris Rauwendaal, 2010, ptonline.com
3. Extrusion Processing, Shokoh Fatahi, aiquruguay.org
4. An Introduction To Materials Engineering And Science For Chemical And Materials' Engineers, Mitchell B., JOHN WILEY & SONS, 2004, ISBN 047-147-336-7
5. Plastic Injection Molding: Manufacturing Startup and Management, Bryce D., Society of Manufacturing Engineers, 1999, ISBN 087-263-503-1
6. Handbook of Plastic Films, Elsayed Abdel-Bary, iSmithers Rapra Publishing, 2003
7. TIME TO LEARN ABOUT Dynamic Optimization of Extruder Barrel Temperatures, Chris Rauwendaal, 2008, ptonline.com
8. EXTRUSION AND COMPOUNDING AT NPE: The Word Is 'More', Jim Callari, 2015, ptonline.com
9. What's the Deal With High-Speed Extruders?, Jim Frankland, 2012, ptonline.com
10. High-Speed Extrusion: Are You Ready for the Fast Lane?, Jan H. Schut, 2008, ptonline.com
11. The Effects of Temperature, Sepe M., 2011, ptonline.com
12. Reinforced Thermoplastics: LFRT/GMT Roundup, Peggy Malnati, 2007, Composites Technology
13. The Role of Rheology in Polymer Extrusion, Vlachopoulos J., Strutt D., Canada
14. The Influence of Injection Moulding Parameters on Surface Resistivity and Surface Quality of Polycarbonate/NC7000 Nanocomposites, Claes M., Belgium
15. Thermoplastics' characteristics and Properties, J.D.Muzzy, USA
16. Thermoplastic Nanocomposites with Carbon Nanotubes, Sathyanarayana S., Hübner C., Germany, 2015
17. Παντελής Δ., Μη μεταλλικά τεχνικά υλικά, 2008, ISBN 960-7182-03-0
18. M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus and P.C. Eklund, "Science of fullerenes and carbon nanotubes", Academic Press, San Diego, 1996

Ιστοσελίδες

1. <http://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=83>
2. https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%86%CE%BD%CE%B8%CF%81%CE%B1%CE%BA%CE%B1%CF%82#.CE.99.CF.83.CF.84.CE.BF.CF.81.CE.AF.CE.B1_.CE.BA.CE.B1.CE.B9_.CE.B5.CF.84.CF.85.CE.BC.CE.BF.CE.BB.CE.BF.CE.B3.CE.AF.CE.B1
3. http://3lyk-thivas.voi.sch.gr/chemistry/b_thet/diamoriakes_dynameis.pdf
4. <http://pslc.ws/macrog/kidsmac/plastic.htm>
5. http://www.csuchico.edu/~jpgreene/m242/m242_c02/sld009.htm
6. <http://www.airbus.com/newsevents/news-events-single/detail/airbus-focus-on-thermoplastic-composite-materials-brings-environmental-and-production-impro/>
7. <http://www.altalinea.gr/6490/%CF%84%CE%B9-%CE%B5%CE%AF%CE%BD%CE%B1%CE%B9-%CE%BF-%E2%80%98%CE%B3%CE%BD%CF%89%CF%83%CF%84%CF%8C%CF%82%E2%80%99-%CE%BC%CE%B1%CF%82-%CE%B2%CE%B1%CE%BA%CE%B5%CE%BB%CE%AF%CF%84%CE%B7%CF%82/>
8. <http://composite.about.com/od/aboutcompositesplastics/a/Thermoplastic-Vs-Thermoset-Resins.htm>