



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Αρχή λειτουργίας μηχανής εξώθησης πολυμερών υλικών μονού
και διπλού κοχλία

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ

Παυλιδάκης Γεώργιος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ

Δρ. Πετούσης Μάρκος

ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2020

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία αρχικά αναλύεται η αρχή λειτουργίας των μηχανών εξώθησης πολυμερών υλικών (πλαστικού) μονού και διπλού κοχλίου. Πρόκειται για μηχανές που χρησιμοποιούν την πρώτη ύλη σε μορφή pellets για χρήση σε διαδικασίες χύτευσης ή νήματος για τρισδιάστατη εκτύπωση. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται έρευνα αγοράς πάνω στις μηχανές extruder οικιακής χρήσης και τέλος, γίνεται μία προσπάθεια βελτιστοποίησης της υπάρχουσας μηχανής εξώθησης (extruder) του Εργαστηρίου Μηχανολογίας Ακριβείας και Αντίστροφης μηχανικής του ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ. Ηρακλείου Κρήτης.

ABSTRACT

In the present thesis, the operating principle of single and double screw polymer (plastic) extrusion machines is first analyzed. These are machines that use the raw material in the form of pellets for use in processes for 3D printing. Then, a market research is carried out on the home extruder machines and finally, an attempt is made to optimize the existing extruder machine of the Laboratory of Precision Engineering and Reverse Mechanics of engineering department EL.MEPA. Heraklion, Crete.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 : Εισαγωγή.

1.1. Στόχος εργασίας.	1
1.2. Ορισμοί.	1
1.3.Μηχανές εξώθησης και 3D εκτυπωτές.	4

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 : Αρχή λειτουργίας μηχανών εξώθησης.

2.1. Ιστορική εξέλιξη εξωθητήρα.	7
2.2. Διαδικασία εξώθησης.	9

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 : Μηχανή Εξώθησης.

3.1. Εξωθητήρας μονού κοχλία.	14
3.2. Εξωθητήρας διπλού κοχλία.	16
3.3. Εξωθητήρας πολλαπλών κοχλίων.	17
3.4. Εξωθητήρες οικιακής χρήσης.	18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 : Οι παράγοντες της εξώθησης.

4.1. Πυκνότητα.	21
4.2. Δείκτης ροής τήγματος.	22
4.3. Τάση.	22
4.4. Ρεύμα.	22
4.5. Ροπή.	23
4.6. Τριβή και πίεση.	23
4.7. Ιξώδες.	26
4.8. Κινητήρας.	27
4.9. Ρουλεμάν.	28
4.10. Όρια και προσαρμογές, διαστασιολόγηση ανοχής.	28
4.11. Ηλεκτρικοί θερμαντήρες.	29
4.12. Αερόψυξη.	29
4.13. Ρελέ στερεάς κατάστασης.	30

4.14. PID controller.	30
4.15. Θερμοστοιχείο.	31
4.16. PTC heater.	32
4.17. Kapton tape.	32
4.18. Αναλογία συμπίεσης.	33
4.19. Αναλογία μήκους προς διάμετρο.	34
4.20. Ενεργειακές απαιτήσεις για εξώθηση.	35
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 : Πειραματικό Μέρος.	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 : Συμπεράσματα.	47
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.	48
Κατάλογος εικόνων.	50

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Στόχος εργασίας.

Στην παρούσα εργασία θα αναλυθεί η αρχή λειτουργίας που διέπει τη μέθοδο μορφοποίησης θερμοπλαστικών πολυμερών με εξώθηση υλικού. Πιο συγκεκριμένα, θα παρουσιαστεί η αρχή λειτουργίας των μηχανών εξώθησης πλαστικού (extruder machine) με ένα ή δύο κοχλίες. Πρόκειται για μηχανές που χρησιμοποιούν την πρώτη ύλη σε μορφή pellets για χρήση σε διαδικασίες χύτευσης ή νήματος για τρισδιάστατη εκτύπωση.

Θα πραγματοποιηθεί έρευνα αγοράς πάνω στις μηχανές extruder, έπειτα θα περιγραφεί η αρχή λειτουργίας τους και οι τεχνικές λεπτομέρειες της διαδικασίας. Τέλος θα γίνει αναφορά στη χρήση των μηχανών αυτών. Επιπλέον, θα γίνει βελτιστοποίηση της υπάρχουσας μηχανής εξώθησης (extruder) του Εργαστηρίου Μηχανολογίας Ακριβείας και Αντίστροφης μηχανικής του ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ. Ηρακλείου Κρήτης. Θα αντικατασταθούν εξαρτήματα για τη βελτίωση της λειτουργίας του εργαστηριακού extruder.

Συνοπτικά τα βήματα για την επιτυχή ολοκλήρωση της πτυχιακής εργασίας είναι:

- 1) Έρευνα αγοράς για τις μηχανές εξώθησης πολυμερούς υλικού, για την κατηγοριοποίηση τους και τον προσδιορισμό των εφαρμογών τους στη βιομηχανία.
- 2) Περιγραφή αρχής λειτουργίας των μηχανών.
- 3) Περιγραφή διαφορών μηχανών μονού και διπλού κοχλία.
- 4) Βελτιστοποίηση εργαστηριακής μηχανής.
- 5) Συγγραφή και παρουσίαση πτυχιακής εργασίας.

1.2. Ορισμοί.

Θερμοπλαστικό Υλικό.

Το θερμοπλαστικό υλικό είναι ένα πλαστικό υλικό, συνήθως ένα πολυμερές, που γίνεται ευλύγιστο ή εύπλαστο πάνω από μια συγκεκριμένη θερμοκρασία και στερεοποιείται με ψύξη. Επομένως, είναι ένα ανακυκλώσιμο υλικό αφού αυτή η διαδικασία μπορεί να πραγματοποιηθεί άπειρες φορές. Τα θερμοπλαστικά μπορούν να ανασχηματιστούν με θέρμανση και χρησιμοποιούνται συνήθως για να

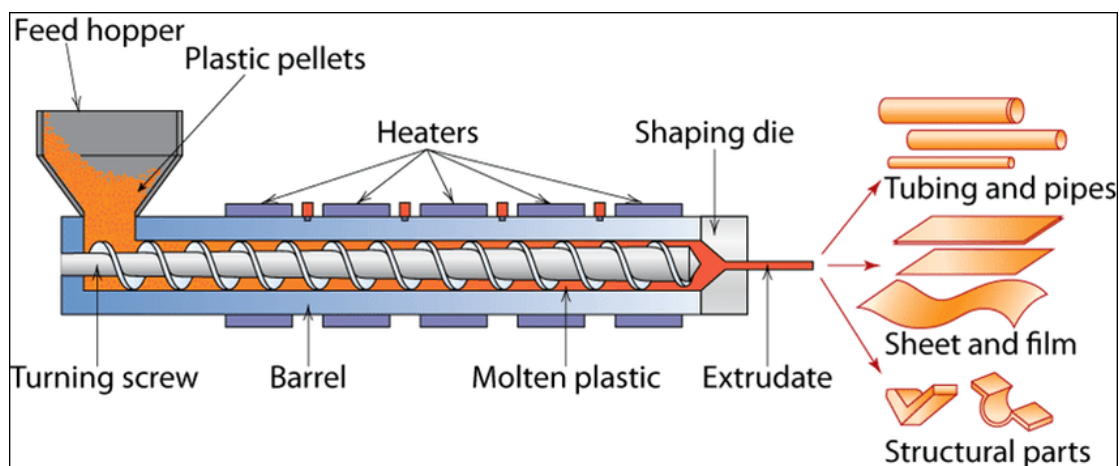
παραγάγουν κομμάτια για χύτευση με έγχυση. Χαρακτηριστικά παραδείγματα θερμοπλαστικών είναι :

- Ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS). Το τριπολυμερές ακρυλονιτρίλιου βουταδιενίου στυρενίου (Acrylonitrile Butadiene Styrene) συντίθεται από στυρένιο και ακρυλονιτρίλιο παρουσία πολυβουταδιενίου. Το ABS είναι ένα υλικό μικρού βάρους που παρουσιάζει υψηλή αντίσταση κρούσης και μηχανική σκληρότητα. Χρησιμοποιείται σε πολλά καταναλωτικά προϊόντα, όπως παιχνίδια, συσκευές και τηλέφωνα.
- Νάιλον. Το νάιλον ανήκει σε μια τάξη πολυμερών που λέγονται πολυαμίδια. Έχει χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο του μεταξιού σε προϊόντα όπως αλεξίπτωτα, προστατευτικά γιλέκα και κάλτσες γυναικών. Οι ίνες νάιλον είναι χρήσιμες στην κατασκευή υφασμάτων, σκοινιών, χαλιών και μουσικών χορδών, ενώ σε χύμα μορφή, το νάιλον χρησιμοποιείται για μηχανικά κομμάτια συμπεριλαμβανομένων βιδών, οδοντωτών τροχών και περιβλημάτων εργαλείων. Επιπλέον, το νάιλον χρησιμοποιείται στην κατασκευή σύνθετων θερμοάντοχων υλικών.
- Πολυγαλακτικό οξύ (PLA). Το πολυγαλακτικό οξύ ή πολυλακτίδιο είναι ένας βιοδιασπάσιμος θερμοπλαστικός αλειφατικός πολυεστέρας που παρασκευάζεται από ανανεώσιμες πηγές, όπως άμυλο καλαμποκιού (στις ΗΠΑ), ρίζες από ταπιόκα, πατατάκια ή άμυλο (κυρίως στην Ασία), ή ζαχαροκάλαμο (στον υπόλοιπο κόσμο). Είναι ένα από τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τρισδιάστατη εκτύπωση με την τεχνική σύντηξης διαδοχικών στρώσεων (Fused Deposition modeling-FFF).
- Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC). Το πολυβινυλοχλωρίδιο είναι ένα σκληρό, ελαφρύ υλικό που αντέχει σε οξέα και βάσεις. Οι μεγαλύτερες ποσότητες χρησιμοποιούνται στις κατασκευές, όπως για παρακάμψεις, σωλήνες αποχέτευσης, υδρορροές και φύλλα στέγης. Μετατρέπεται επίσης σε εύκαμπτες μορφές με την προσθήκη πλαστικοποιητών, κάνοντας το συνεπώς χρήσιμο για στοιχεία όπως σωλήνες, σωληνώσεις, ηλεκτρική μόνωση, πανωφόρια, σακάκια και επενδύσεις. Το ευλύγιστο PVC χρησιμοποιείται επίσης σε φουσκωτά προϊόντα, όπως κρεβάτια με νερό και παιχνίδια πισίνας.

- **Τεφλόν.** Το τεφλόν είναι εμπορικό όνομα της DuPont για διάφορα πολυμερή πολυτετραφθοροαιθυλενίου (PTFE), που ανήκει σε μια τάξη θερμοπλαστικών γνωστών ως φθοροπολυμερή. Είναι γνωστό ως επικάλυψη για μη κολλώδη κουζίνα σκεύη. Επειδή είναι χημικά αδρανές, χρησιμοποιείται στην κατασκευή περιεκτών και σωλήνων που έρχονται σε επαφή με δραστικές ενώσεις. Χρησιμοποιείται επίσης ως λιπαντικό για να μειώσει τη φθορά από τριβή μεταξύ ολισθαινόντων τμημάτων, όπως γρανάζια, έδρανα και κουζινέτα. (<https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoplastic>)

Εξώθηση.

Ο όρος εξώθηση αναφέρεται στη διαδικασία κατά την οποία μια μηχανή ωθεί κάποιο υλικό να περάσει διαμέσου μιας οπής, προκειμένου να παράξει το επιθυμητό προϊόν.(εικόνα 1.1). (Rauwendaal C., 2013)



Εικόνα 1.1 : Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας εξώθησης.

Η πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται για μορφοποίηση είναι διαθέσιμη σε :

- Κόκκους (granules),
- Σκόνη (Powder),
- Πλακίδια (pellets) και
- Υγρά (liquids).

Η εξώθηση είναι μία μέθοδος με μεγάλη προσαρμοστικότητα. Έχει σχετικά χαμηλό κόστος λειτουργίας, αν και το κόστος επένδυσης για την αγορά των μηχανών είναι σχετικά υψηλό. Μπορούμε να επιτευχθεί συνεχής παραγωγή προϊόντος με υψηλή ταχύτητα παραγωγής. Η πίεση λειτουργίας κυμαίνεται από 1,4 - 10,4 MPa. Γίνεται παραγωγή φύλλων, ράβδων, σωλήνων και νήματος. Τέλος, λόγω προσανατολισμού των μακρομορίων κατά τη διεύθυνση διέλασης, τα προϊόντα της εξώθησης παρουσιάζουν μεγάλη αντοχή.

Η μηχανή διέλασης είναι σχεδιασμένη για :

- Μεταφορά της σκόνης ή των πλακιδίων της πρώτης ύλης από τη χοάνη ανάμειξης τροφοδοσίας στο κανάλι του ατέρμονα κοχλία.
- Να συμπιέζει το υλικό της πρώτης ύλης και να το μετακινεί μέσα στο κανάλι.
- Να τήκει το υλικό με θέρμανση.
- Να αναμειγνύει το τηγμένο υλικό και να το καθιστά ομοιογενές τήγμα (χωρίς απομένοντα στερεά) και τέλος
- Να ωθεί το υλικό στο καλούπι (δημιουργώντας την κατάλληλη πίεση).

1.3. Μηχανές εξώθησης και εκτυπωτές τριών διαστάσεων.

Η τρισδιάστατη εκτύπωση έκανε την εμφάνισή της το 1982 από τον Chuck Hull. Ο Hull είχε την ιδέα ότι αν μπορούσε να τοποθετήσει χιλιάδες λεπτά στρώματα πλαστικού το ένα πάνω από το άλλο και στη συνέχεια να χαράξει το σχήμα τους, χρησιμοποιώντας το φως, τότε θα ήταν σε θέση να σχηματίσει τρισδιάστατα αντικείμενα. Η ευρεσιτεχνία του ονομάστηκε *στερεολιθογραφία* ή *3D εκτύπωση*, καθώς κάλυπτε κάθε υλικό ικανό προς στερεοποίηση ή ικανό να μεταβάλει τη φυσική του κατάσταση.

Η βασική ιδέα πίσω από την τρισδιάστατη εκτύπωση συναντάται στο όπως ακριβώς ένας εκτυπωτής ψεκασμού μελάνης προσθέτει μεμονωμένες κουκίδες του μελανιού για να σχηματίσουν μια εικόνα, ένας 3D εκτυπωτής προσθέτει υλικό μόνο όπου χρειάζεται, ακολουθώντας εντολές από ένα ψηφιακό αρχείο.

Μόλις φορτωθεί το ψηφιακό μοντέλο στον εκτυπωτή, το μηχάνημα αναλαμβάνει αυτόματα τη δημιουργία του επιθυμητού αντικειμένου. Ενώ οι διεργασίες εκτύπωσης ποικίλλουν ανάλογα με τον τύπο της τεχνολογίας του 3D εκτυπωτή, η εξώθηση

υλικού (η οποία περιλαμβάνει έναν αριθμό διαφορετικών τύπων διεργασιών) είναι η πιο κοινή μέθοδος που χρησιμοποιείται στους επιτραπέζιους 3D εκτυπωτές.

Η **εξώθηση υλικού** λειτουργεί σαν ένα πυροβόλο όπλο κόλλας. Το υλικό εκτύπωσης, κατά κανόνα ένα πλαστικό νήμα, θερμαίνεται μέχρις ότου υγροποιείται και εξωθείται μέσω του ακροφυσίου (η άκρη από την οποία εκτινάσσεται το νήμα) εκτύπωσης. Χρησιμοποιώντας πληροφορίες από το ψηφιακό αρχείο, ο σχεδιασμός είναι χωρισμένος σε λεπτές δισδιάστατες διατομές, ώστε ο εκτυπωτής να ξέρει ακριβώς πού να τοποθετήσει το πλαστικό υλικό (πολυμερές) μέσω του ακροφυσίου σε λεπτές στρώσεις, συχνά 0,1 χιλιοστά (mm) πάχος. Το πολυμερές στερεοποιείται γρήγορα και δένεται με το κάτω στρώμα του υλικού, πριν χαμηλώσει η πλατφόρμα και η κεφαλή εκτύπωσης προσθέσει άλλο στρώμα. Ανάλογα με το μέγεθος και την πολυπλοκότητα του αντικειμένου, η όλη διαδικασία μπορεί να διαρκέσει από λεπτά έως ημέρες.

Η τεχνολογία των 3D εκτυπωτών βρίσκει χρήση στους τομείς :

- Του κοσμήματος,
- Των υποδημάτων,
- Του βιομηχανικού σχεδιασμού.
- Της αρχιτεκτονικής,
- Της μηχανικής και των κατασκευών (AEC),
- Της αυτοκινητοβιομηχανίας,
- Της αεροδιαστημικής,
- Της οδοντιατρικής και ιατρικής βιομηχανίας,
- Της εκπαίδευσης,
- Της χαρτογράφησης πληροφοριακών συστημάτων σε έργα πολιτικών μηχανικών κ.α.

Ειδικά με τους εκτυπωτές που χρησιμοποιούν πλαστικό μπορούν να κατασκευαστούν εξολκείς λαστίχου ποδηλάτου, κρεμάστρες, καπάκια, εργαλεία για Dremel, κλπ. Με τη χρήση πλαστικού και σχεδίων 3D, που βρίσκονται ελεύθερα στο internet, ή που μπορεί κάποιος μόνος του να δημιουργήσει, μπορεί πολύ εύκολα να φτιαχτεί από το πιο μικρό εξάρτημα, έως ολόκληρη κατασκευή κομμάτι-κομμάτι (εικόνα 1.2).(https://el.wikipedia.org/wiki/Τρισδιάστατη_εκτύπωση)

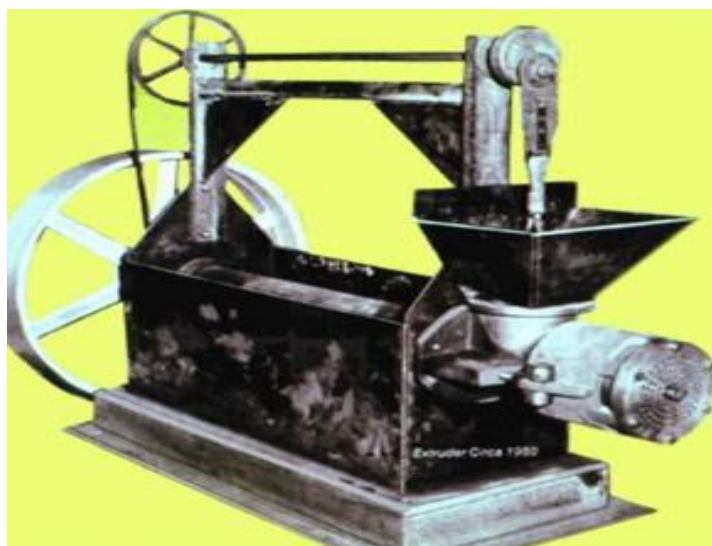


Εικόνα 1.2 : Διάφορα προϊόντα 3D εκτυπωτών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΜΗΧΑΝΩΝ ΕΞΩΘΗΣΗΣ

2.1 Ιστορική εξέλιξη εξωθητήρα.

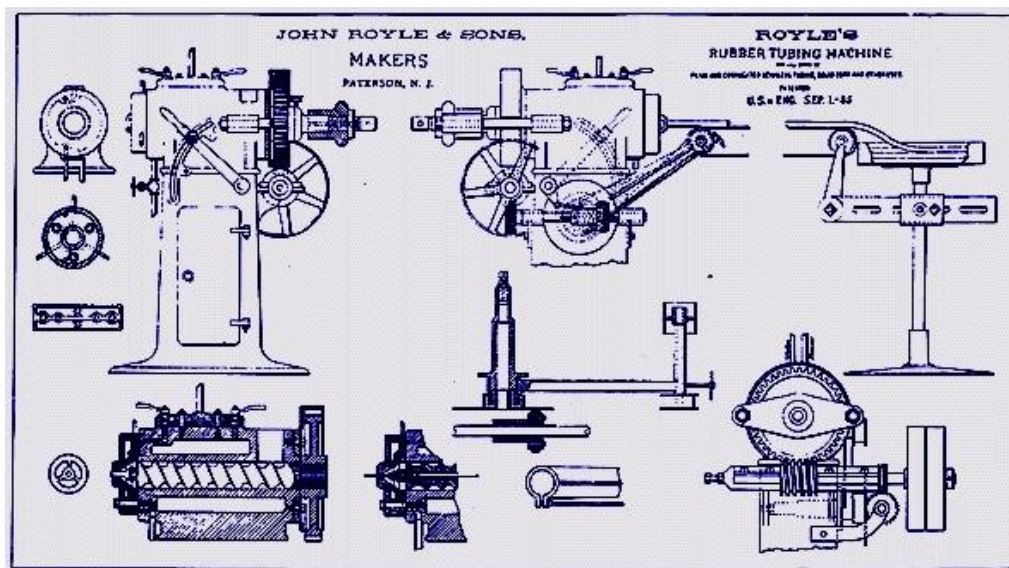
Ο εξωθητήρας αρχικά δημιουργήθηκε από το μηχανικό Charles Hancock και τους συνεργάτες του για την ανάμειξη διαφόρων υλικών. Το **1870** κατασκευάστηκε η πρώτη μηχανή εξώθησης και το **1890** παράχθηκε στις ΗΠΑ για εμπορικούς σκοπούς. Στην Ευρώπη, το **1900**, οι Francis Shaw και Paul Troester ανέπτυξαν το πρώτο σύστημα εξώθησης σε εμπορική κλίμακα. Παρακάτω φαίνεται μία από τις πρώτες μορφές ενός εξωθητήρα (εικόνα 2.1) (Crowther, 1998).



Εικόνα 2.1 : Μορφή ενός εξωθητήρα το 1948.

Η τεχνολογία της εξώθησης παρουσιάστηκε στα τέλη του 1870. Αυτό που έφερε επανάσταση στο σύστημα εξώθησης ήταν η ακριβής ρύθμιση της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της εξώθησης. Λόγω αυτής της τεχνολογίας μειώθηκαν αποτελεσματικά οι πλαστικές παραμορφώσεις. Παράλληλα αυξήθηκε η παραγωγή διαφόρων θερμοπλαστικών πολυμερών. Οι μηχανές εξώθησης τότε είχαν τη δυνατότητα να επεξεργάζονται μόνο συγκεκριμένα πολυμερή. Από το **1960** και μετά οι συνεχείς εξελίξεις στην κατασκευή μηχανών εξώθησης επικεντρώθηκαν στο σχεδιασμό και στην κατασκευή μηχανημάτων εξώθησης που να μπορούν να ενσωματώσουν και να επεξεργαστούν την ευρεία ποικιλία των διάφορων πολυμερών. Ο βασικός σχεδιασμός των μηχανημάτων εξώθησης δεν έχει αλλάξει. Κατά την παραγωγική διαδικασία όλες οι μηχανές εξώθησης ακολουθούν ως αρχή ορισμένες βασικές μηχανικές διαδικασίες. Στην εικόνα 2.2 που ακολουθεί φαίνεται η σχηματική

απεικόνιση του πρώτου US extruder, από τους John Royle & Sons, που αποτελεί μία πατέντα του 1885. (Crowther, 1998).



Εικόνα 2.2 : Σχηματική απεικόνιση του πρώτου US extruder, από τους John Royle & Sons (πατέντα του 1885).

Με την εξέλιξη των μηχανών εξώθησης αυξήθηκε η ζήτηση των πλαστικών προϊόντων, τα οποία άρχισαν να έχουν ολοένα και περισσότερες εφαρμογές. Η επόμενη γενιά εξωθητών άρχισε όταν επικεντρώθηκαν στη βελτίωση της μήτρας. Η συμπίεση και η πίεση μελετήθηκαν μαζί. Ο χρόνος περιστροφής του κοχλία κατέστησε αναγκαίο να αναπτυχθούν οι αρχές του εξωθητήρα με δύο κοχλίες παράλληλα τοποθετημένους που περιστρέφονται είτε με την ίδια φορά είτε αντίθετα, χωρίς αυτό να αντικαθιστά τα πρώτα μηχανήματα μονού κοχλία, καθώς το κάθε μηχανήμα χρησιμοποιείται σε διαφορετικές εφαρμογές. Τέλος μεγάλη σημασία δόθηκε στην ανάλυση της παραγόμενης πίεσης. (Taylor and Francis Group, 2011).

Πρόσφατα οι εξωθητήρες έγιναν πλήρως αυτοματοποιημένοι και υπάρχει τεράστια ανάπτυξη στο σύστημα εξώθησης. Τα συστήματα εξώθησης έχουν πλέον υψηλή ζήτηση, από πλαστικούς σωλήνες μέχρι αντικείμενα που τυπώνονται από 3D εκτυπωτή, χρησιμοποιώντας την ίδια εξώθηση με τη συγχώνευση των τελευταίων τεχνολογιών. Η εξέλιξη στην τεχνολογία αυτή έχει δύο κλάδους, ο πρώτος εστιάζει στην υψηλή απόδοση ενώ ο δεύτερος στην ανάπτυξη του τελικού προϊόντος. Ενσωματώνει στην τεχνολογία των επιφανειών τη χρήση της νανοτεχνολογίας. Σύμφωνα με το ιστορικό υπόβαθρο ξεκινώντας από ένα ευρύ φάσμα τεχνολογιών εξώθησης, η πρόοδος συνεχίζεται για την παραγωγή βιώσιμων / οικολογικά φιλικών βιοπολυμερών όπως PLA ή νανο-σύνθετα. (SAKAI, 2013).

2.2. Διαδικασία εξώθησης.

Η εξώθηση είναι μία διαδικασία που χρησιμοποιείται για τη δημιουργία αντικειμένων ενός σταθερού συγχρονισμένου προφίλ. Ένα υλικό ωθείται ή περνά μέσα από το καλούπι, από την επιθυμητή διατομή του. Τα δύο βασικά πλεονεκτήματα αυτής της διαδικασίας σε σχέση με άλλες βιομηχανοποιημένες διαδικασίες είναι η ικανότητά της να δημιουργεί πολύ πολύπλοκες διατομές και υλικά εργασίας που είναι εύθραυστα, διότι το υλικό συναντά μόνο θλίψη και διάτμηση. Επίσης, τα τελικά τμήματα έχουν ένα εξαιρετικό φινίρισμα επιφάνειας. (<http://digilib.teiemt.gr/jspui/bitstream/123456789/1473/1/012010031.pdf>).

Η εξώθηση μπορεί να είναι συνεχής (θεωρητικά μπορεί να παράγει υλικό επ' αορίστου μήκους) ή ημισυνεχής (να παράγει δηλαδή πολλά τεμάχια). Η διαδικασία της εξώθησης μπορεί να γίνει με ζεστό ή κρύο υλικό.

Η διέλαση, ανάλογα με τη διαδικασία που ακολουθείται, χωρίζεται σε υπέρθερμη εξώθηση, ψυχρή εξώθηση και θερμή εξώθηση.

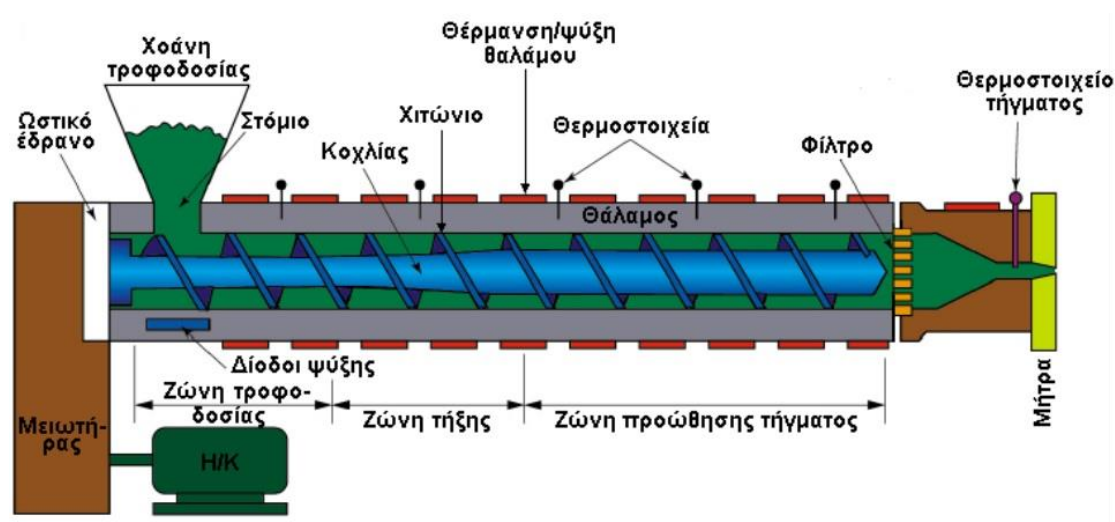
Υπέρθερμη εξώθηση. Γίνεται σε υψηλή θερμοκρασία για τη διατήρηση του υλικού από τη σκλήρυνση και για να μπορεί να καταστεί ευκολότερη η ώθηση του υλικού μέσω του καλουπιού. Οι περισσότερες εξωθήσεις αυτού του τύπου γίνονται σε οριζόντιες υδραυλικές πρέσες, που κυμαίνονται από 205 – 12.000 τόνους και πιέσεις μεταξύ 30 – 700 MPa. Απαιτείται λίπανση, η οποία μπορεί να είναι λάδι ή γραφίτης (για χαμηλότερες θερμοκρασίες εξώθησης) ή πούδρα (για την υψηλότερη θερμοκρασία εξώθησης). Το μεγαλύτερο μειονέκτημα αυτής της διαδικασίας είναι το κόστος για τα μηχανήματα και για τη συντήρησή τους.

Ψυχρή εξώθηση. Γίνεται σε θερμοκρασία δωματίου ή κοντά σε αυτήν. Τα πλεονεκτήματά της σε σχέση με την υπέρθερμη είναι η έλλειψη της οξειδωσης, υψηλότερη αντοχή (που οφείλεται στην κρύα εργασία), καλή επιφάνεια και υψηλές ταχύτητες διέλασης (εάν το υλικό υπόκειται σε σύντομη θέρμανση). Παραδείγματα υλικών που συνηθίζονται να χρησιμοποιούνται στη ψυχρή διέλαση είναι ο μόλυβδος, ο κασσίτερος, το αλουμίνιο, ο χαλκός.

Θερμή εξώθηση. Γίνεται υψηλότερα από τη θερμοκρασία δωματίου, αλλά κάτω από τη θερμοκρασία κρυσταλλοποίησης του υλικού. Συνήθως χρησιμοποιείται για να επιτευχθεί η σωστή ισορροπία των δυνάμεων που απαιτούνται, η ολκιμότητα και οι τελικές ιδιότητες εξώθησης.

Η διαδικασία της εξώθησης είναι απλή και μπορεί να χωριστεί σε έξι διαφορετικά στάδια επεξεργασίας (εικόνα 2.3):

1. Ζώνη τροφοδοσίας
2. Ζώνη τήξης
3. Ζώνη προώθησης τήγματος
4. Μίξη
5. Θερμοστοιχείο τήγματος
6. Μήτρα



Εικόνα 2.3 : Σχηματική απεικόνιση των 6 σταδίων επεξεργασίας κατά τη διαδικασία εξώθησης.

Η μονάδα εξώθησης περιλαμβάνει :

- τον ηλεκτρικό κινητήρα,
- το μειωτήρα στροφών,
- τη χοάνη τροφοδοσίας,
- το θάλαμο,
- τον κοχλία,
- τη μονάδα ελέγχου θερμότητας και
- τη μήτρα.

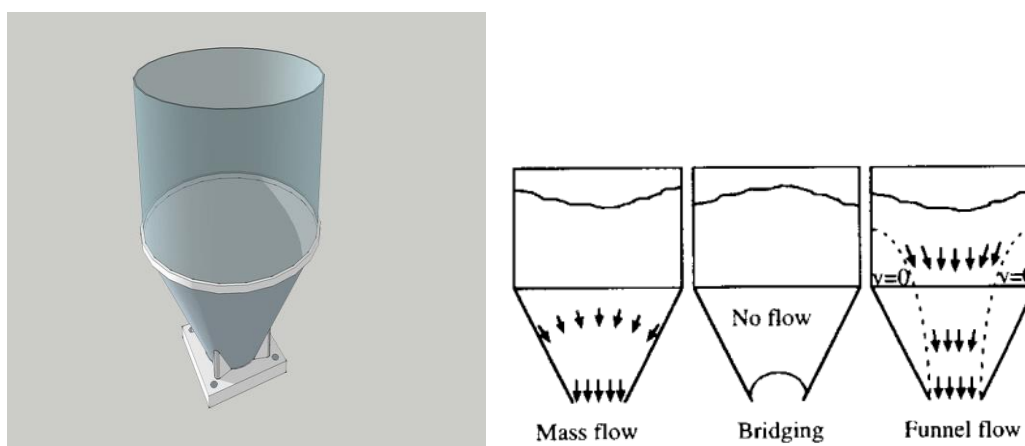
Λόγω της βαρυτικής δύναμης η ρητίνη ή οι πλαστικοί κόκκοι, από τη χοάνη τροφοδοσίας, πέφτουν στον περιστροφικό κοχλία του εξωθητήρα. Καθώς ο κοχλίας περιστρέφεται αναπτύσσεται μια δύναμη τριβής και δημιουργείται έτσι θερμότητα διάτμησης. Για την τήξη του πλαστικού, τοποθετούνται επιπρόσθετα θερμοστοιχεία

γύρω από το θάλαμο του εξωθητή. Ο ηλεκτρικός έλεγχος θερμότητας των θερμοστοιχείων λειτουργεί ως επιπρόσθετη θερμική ενέργεια για τη διαδικασία εφόσον χρειάζεται. Αποτρέπει επίσης τη διαφυγή θερμότητας από το σύστημα, με τη μόνωση του θαλάμου ακτινικά γύρω από αυτόν, όπου κινείται το λιωμένο πλαστικό το οποίο εκβάλλεται τελικά από τη μήτρα (Harod F.giles, 2005).

Στη συνέχεια το τετηγμένο πλαστικό πρέπει να περάσει διαμέσου ενός φίλτρου, για να απαλλαγεί από ακαθαρσίες, ώστε να μπορεί να περάσει από τη μήτρα και να λάβουμε το τελικό προϊόν. Η εξώθηση είναι μια συνεχής διαδικασία παραγωγής ή κατασκευής προϊόντων σε μεγάλη κλίμακα. Είναι πολύ σημαντική η γνώση των σωστών μετρήσεων θερμοκρασίας και ελέγχου λειτουργίας που απαιτούνται να πραγματοποιηθούν για τα διάφορα πολυμερή και τις ρητίνες. Το ακριβές και ικανοποιητικό προϊόν μπορεί να παραχθεί μόνο αν κάθε βήμα σε αυτή τη διαδικασία πηγαίνει σωστά. Κατά τη διάρκεια της εξώθησης, μπορούν να υπάρξουν πολλές αστοχίες στο τελικό προϊόν, για παράδειγμα αν η θερμοκρασία δεν έχει ρυθμιστεί σωστά, ανεξάρτητα από το πόσο καλή είναι η ρητίνη που χρησιμοποιούμε το προϊόν μας δε θα είναι τόσο καλό όσο θα έπρεπε.

Χοάνη τροφοδοσίας

Εξαιτίας της δύναμης της βαρύτητας, οι κόκκοι φθάνουν στο σύστημα μέσω της χοάνης τροφοδοσίας. Η χοάνη έχει σχήμα σα χωνί (εικόνα 2.4), για να είναι σίγουρο ότι οι κόκκοι θα μπορούν να γλιστρήσουν μέσω της γωνιακής επιφάνειας μέσα στο θάλαμο. Οι περισσότερες χοάνες είναι τοποθετημένες με σύστημα παξιμαδιών και είναι αποσπώμενες, για να μπορούν να αντικατασταθούν με κατάλληλο μέγεθος σύμφωνα με την τροφοδοσία που απαιτείται στο σύστημα. (Crawford, 2005).



Εικόνα 2.4 : Χοάνης τροφοδοσίας μέσω της οποίας φθάνουν οι κόκκοι στο σύστημα.

Οι χοάνες τροφοδοσίας έχουν στο ανώτερο τμήμα κυλινδρική διατομή και καταλήγουν σε κωνική περιοχή ώστε να διευκολύνεται η ροή τροφοδοσίας σε ρυθμούς υψηλότερους των απαιτήσεων του εξωθητή. Η γωνία της εξόδου της χοάνης πρέπει να είναι τέτοια ώστε να διευκολύνεται η απρόσκοπτη ολίσθηση των σωματιδίων του υλικού.

Τα σωματίδια του υλικού τροφοδοσίας πρέπει να ρέουν ελεύθερα και να έχουν χαμηλή συμπιεστότητα για να αποφεύγεται η συσσωμάτωση. Υλικά που δεν περιέχουν σωματίδια μικρότερα από 0.2 mm έχουν τυπικά ελεύθερη ροή.

Κυλινδρικός θάλαμος

Οι κόκκοι θερμαίνονται μέσω των πέντε καναλιών θέρμανσης χρησιμοποιώντας PTC ή κεραμικές θερμαντικές συσκευές γύρω από τον κυλινδρικό θάλαμο (εικόνα 2.5). Οι κόκκοι περνάνε από τη στερεή τους κατάσταση, σε υγρή κατάσταση όπου και αναμιγνύονται. Αυτό είναι επίσης γνωστό ως ζώνη τήξης και ζώνη προώθησης τήγματος. Με τη δύναμη τριβής που αναπτύσσεται μεταξύ του κοχλία και των κόκκων, οι θερμοκρασίες του κυλίνδρου γίνονται αρκετά υψηλές, ώστε να καθιστούν εύκολη την τήξη του πλαστικού. Το τετηγμένο υλικό δια μέσου του θαλάμου εισέρχεται στις οπές του καλουπιού όπου δίδεται το τελικό σχήμα του προϊόντος. (Crawford, 2005).



Εικόνα 2.5 : Κυλινδρικός θάλαμος δια μέσου του οποίου εισέρχεται το τετηγμένο υλικό στις οπές του καλουπιού.

Κοχλίας

Ο κοχλίας (εικόνα 2.6) παίζει σημαντικό ρόλο στην εξώθηση. Η χρήση του είναι απαραίτητη για την ώθηση του υλικού που τροφοδοτείται στο σύστημα από τη χοάνη. Καθώς περιστρέφεται σπρώχνει τους κόκκους στον κυλινδρικό θάλαμο. Ο κοχλίας είναι το πιο κρίσιμο μέρος του μηχανισμού για το σχεδιασμό αποτελεσματικού προϊόντος, αν για παράδειγμα παρουσιάσει αστάθειες θα προκαλέσει ακατάλληλα αποτελέσματα στο τελικό προϊόν. Η ταχύτητα του κοχλίας μπορεί να καθοριστεί από τη μονάδα ελέγχου (Crawford, 2005).

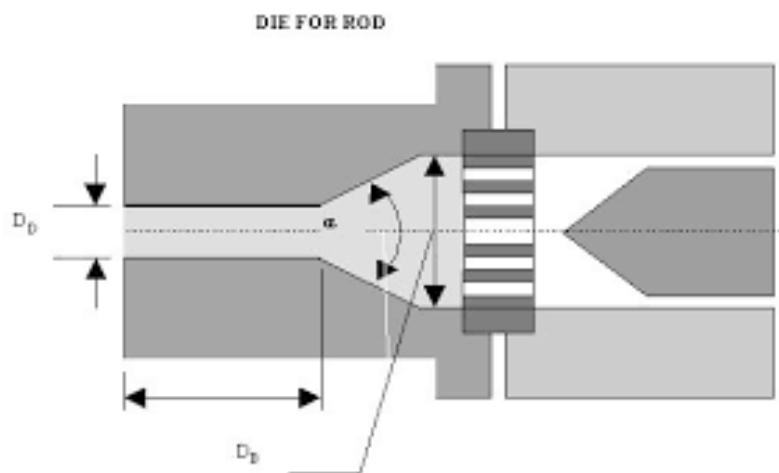


Εικόνα 2.6 : Κοχλίας που ωθεί το υλικό που τροφοδοτείται στο σύστημα από τη χοάνη.

Μήτρα

Ο εξωθητής περιλαμβάνει ένα φίλτρο (breaker plate) τοποθετημένο στην κεφαλή του κυλινδρικού θαλάμου που συνδέεται με τη μήτρα. Επίσης τοποθετούνται συχνά, μεταξύ της μήτρας και του εξωθητήρα, αντλίες γранаζιών για την παραγωγή ομοιόμορφης πίεσης, ώστε να παραχθούν ομοιόμορφες διατομές. Παρέχουν μια σφράγιση μεταξύ του εξωθητήρα και της μήτρας και λόγω του ότι περιέχουν πολλές οπές, αναγκάζουν το πλαστικό να περάσει σε ευθεία γραμμή μετά από την περιστροφική κίνηση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Εμποδίζει επίσης και άλλες ακαθαρσίες να εισέλθουν στη μήτρα. Οι μήτρες (εικόνα 2.7) είναι όλες αντικαταστάσιμες και αλλάζουν σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προϊόντος. Η περιοχή ανοίγματος της μήτρας είναι συνήθως μεγαλύτερη από την έξοδο στην τελική

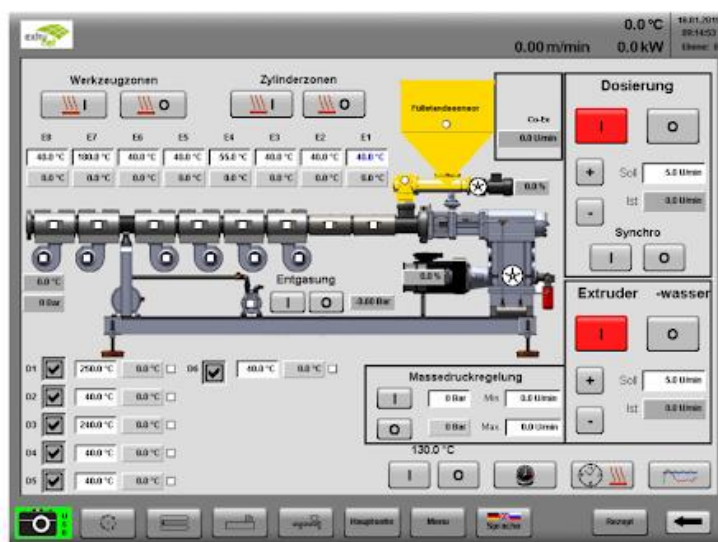
πλευρά. Συνεπώς, η μήτρα είναι μια βασική μονάδα του εξωθητήρα καθ 'όλη τη διαδικασία εξώθησης (Crawford, 2005).



Εικόνα 2.7 :Μήτρα, μια βασική μονάδα του εξωθητήρα.

Μονάδα ελέγχου

Η μονάδα ελέγχου (εικόνα 2.8) είναι η συσκευή στην οποία είναι συνδεδεμένη η κάθε συσκευή για να λειτουργεί. Η μονάδα αναλογικού ή ψηφιακού ελέγχου μπορεί να ελέγξει την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος. Επίσης, η ταχύτητα και η θερμότητα στο θάλαμο μπορούν εύκολα να διατηρηθούν με τη βοήθεια αυτής της μονάδας ελέγχου. Είναι απλά το σύνολο όλων των ηλεκτρονικών της μηχανής, που συνδέονται μαζί για να κάνουν εύκολη την εξώθηση. Η τιμή παραγωγής και η ισχύς που λαμβάνεται από τον κινητήρα εμφανίζονται επίσης εδώ στην οθόνη του πίνακα ελέγχου της μονάδας ελέγχου (Crawford, 2005).



Εικόνα 2.8 :Μονάδα ελέγχου. Σε αυτή είναι συνδεδεμένη η κάθε συσκευή για να λειτουργεί.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 . ΜΗΧΑΝΗ ΕΞΩΘΗΣΗΣ (ΕΞΩΘΗΤΗΡΑΣ).

Οι εξωθητήρες αποτελούνται από μία αντλία τύπου κοχλία (βίδας), όμοια με το πιεστήριο κοχλία ή τον κοχλία μεταφοράς, όπου η πρώτη ύλη συμπιέζεται και δουλεύεται έτσι ώστε να λάβει τη μορφή μιας ημιστερεάς μάζας. Η μάζα αυτή εξαναγκάζεται να διέλθει μέσω ενός στενού ανοίγματος (μήτρα ή καλούπι), το οποίο βρίσκεται στην έξοδο της βίδας.

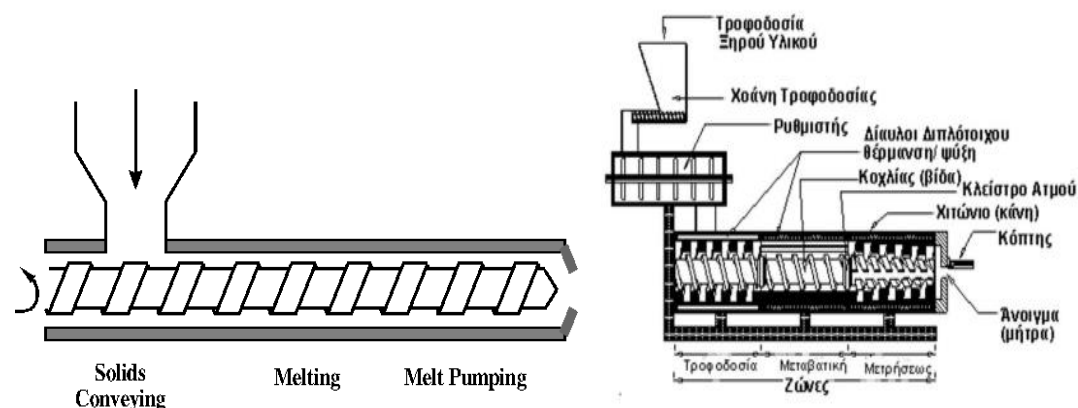
Ο εξωθητήρας ταξινομείται σε διάφορους τύπους ανάλογα με τον αριθμό των κοχλιών. Υπάρχουν βασικά 3 τύποι εξωθητήρων:

- Εξωθητήρας μονού κοχλία
- Εξωθητήρας διπλού κοχλία
- Εξωθητήρας πολλαπλών κοχλιών

Η παρούσα εργασία ασχολείται με τους εξωθητήρες μονού και διπλού κοχλία.

3.1 Εξωθητήρας μονού κοχλία.

Οι εξωθητήρες μονού κοχλία (εικόνα 3.1) είναι οι μηχανές εξώθησης οι οποίες έχουν μόνο έναν κοχλία στο σύστημα. Χρησιμοποιούνται συνήθως για τα απλά υλικά. Τα τελευταία χρόνια, έχουν γίνει έρευνες για πιο συνεχή και σταθερή εξώθηση. Κατά τη διάρκεια της εξώθησης, το υλικό αναμειγνύεται μέσα στον κυλινδρικό θάλαμο μέχρι το τέλος του μήκους της μηχανής εξώθησης.



Εικόνα 3.1 : Σχηματική αναπαράσταση Εξωθητήρα μονού κοχλία.

Σε ένα εξωθητήρα μονού κοχλία υπάρχουν τρεις τύποι ροής :

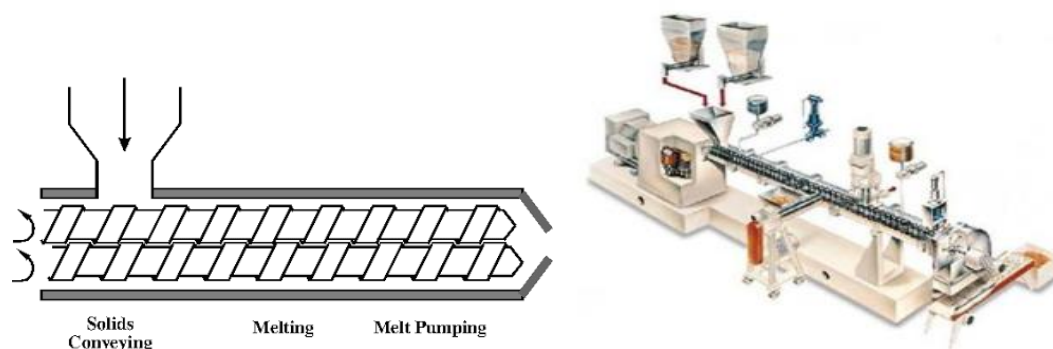
- Ροή ολισθήσεως (drag flow),
- Εγκάρσια ροή (cross channel flow) και
- Ροή πίεσεως (pressure flow).

Όταν συνδυάζονται και οι τρεις τύποι ροής, το καθαρό αποτέλεσμα είναι η ροή του υλικού εκτός του μικρού ανοίγματος (μήτρα) του εξωθητήρα, το οποίο δέχθηκε κάποιο βαθμό αναμείξεως.

Οι εξωθητήρες μονού κοχλία έχουν μικρότερο κόστος κεφαλαίου και λειτουργίας και απαιτούν μικρότερη δεξιότητα για τη λειτουργία και τη συντήρησή τους από τους εξωθητήρες διπλού κοχλία.

3.2. Εξωθητήρας διπλού κοχλία.

Ο διπλός εξωθητήρας (εικόνα 3.2) χρησιμοποιείται γενικά για την επεξεργασία του υλικού σε μορφή σκόνης. Αυτός ο εξωθητήρας έχει καλύτερη ικανότητα καθαρισμού και δυνατότητα ανάμιξης. Χρησιμοποιείται επίσης στον τομέα της μορφοποίησης του πλαστικού σε μορφή πέλετ. Η απόδοση που παίρνουμε από το σύστημα εξώθησης διπλού κοχλία είναι πιο ποιοτική.



Εικόνα 3.2 : Σχηματική αναπαράσταση Εξωθητήρα διπλού κοχλία.

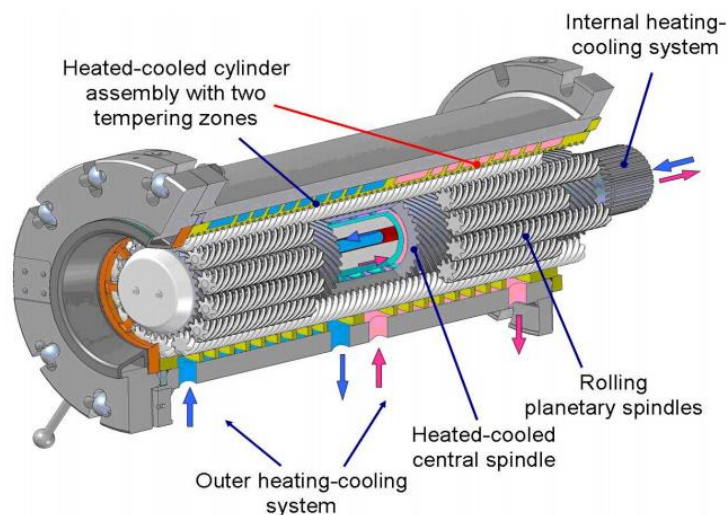
Βασικά πλεονέκτηματα του εξωθητήρα διπλού κοχλία είναι ότι :

- Το βραχύ τμήμα απορρίψεως αναπτύσσει την απαιτούμενη για την εξώθηση πίεση και έτσι υποβάλλει ένα λεπτό τμήμα του εξοπλισμού σε φθορά, απ' ότι στους εξωθητήρες μονού κοχλία.

- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα μίγμα μεγέθους σωματιδίων, από λεπτή σκόνη μέχρι κόκκους, ενώ οι εξωθητήρες μονού κοχλία περιορίζονται σε κοκκώδη υλικά εντός μιας ειδικής περιοχής μεγεθών.
- Η απόδοση εξαρτάται από το ρυθμό τροφοδοσίας και οι διακυμάνσεις στο ρυθμό παραγωγής μπορεί να συνοδεύονται από τη δράση της θετικής εκτοπίσεως των κοχλιών. Σε αντίθεση, οι εξωθητήρες μονού κοχλία πρέπει να είναι πλήρεις υλικού για να λειτουργήσουν αποτελεσματικά και τέλος
- Η θετική εκτόπιση παράγει υψηλότερους ρυθμούς μεταδόσεως θερμότητας και καλύτερο έλεγχο της μεταφερόμενης θερμότητας από τους εξωθητήρες μονού κοχλία.

3.3. Εξωθητήρας πολλαπλών κοχλιών.

Ο εξωθητήρας πολλαπλών κοχλιών (εικόνα 3.3) χρησιμοποιείται όταν χρειαζόμαστε καλύτερη απόδοση. Τα υλικά δεν παρουσιάζουν προβλήματα ανάμειξης σε αυτόν τον τύπο εξωθητή. Η ποιότητα του τελικού προϊόντος είναι πολύ καλή. Αυτός ο τύπος μηχανής μπορεί να έχει οποιοδήποτε αριθμό κοχλιών ανάλογα με την ανάγκη των χρήσεων.

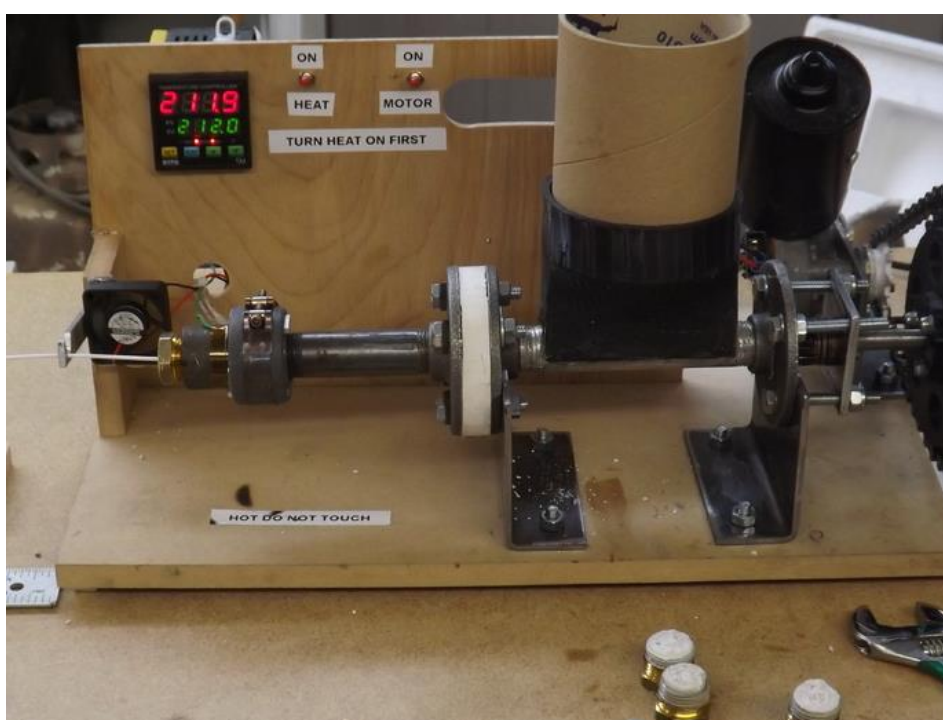


Εικόνα 3.3 : Σχηματική αναπαράσταση Εξωθητήρα πολλαπλών κοχλιών.

3.4. Εξωθητήρες οικιακής χρήσης (extruders D.I.Y.)

Ο εξωθητής νήματος Lyman (εικόνα 3.4) είναι μια συσκευή με την οποία μπορείς να κατασκευάσεις τρισδιάστατο νήμα κατάλληλο για χρήση σε 3D εκτυπωτές. Πήρε το όνομά του από τον προγραμματιστή του Hugh Lyman που ήταν και ο νικητής του Desktop Factory Competition. Πρόκειται για έναν εξωθητήρα μονού κοχλίου.

Ο στόχος του παραπάνω διαγωνισμού ήταν να κατασκευαστεί ένας εξωθητής νημάτων ανοιχτού κώδικα που να κοστίζει λιγότερο από 250\$, να μπορεί να δέχεται ως πρώτη ύλη ABS ή PLA ρητίνη, η οποία θα αναμιχθεί με χρωστική για να παραχθεί νήμα διαμέτρου $1,75 \pm 0,05$ mm, το οποίο θα τυλιχτεί σε 1 kg πηνίο.



Εικόνα 3.4 : Ο εξωθητής νήματος Lyman

Η χρήση εξωθητών νήματος DIY όπως του Lyman μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος εκτύπωσης με τρισδιάστατους εκτυπωτές. Ο εξωθητής νήματος Lyman σχεδιάστηκε για να χειρίζεται την πρώτη ύλη σε μορφή pellets, αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή νήματος από άλλες πηγές πλαστικών, όπως ανακυκλωμένο πλαστικό (σημαντικές θετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις). (https://en.wikipedia.org/wiki/Lyman_filament_extruder)

Ένας άλλος εξωθητήρας οικιακής χρήσης είναι ο Noztek Pro Filament Extruder (εικόνα 3.5), ο οποίος συνδυάζει έναν πλανητικό κινητήρα υψηλής ροπής και μια ειδικά κατασκευασμένη βίδα, προσφέροντας γρήγορη εξώθηση σχεδόν κάθε

πολυμερούς σε μορφή pellet ή σε σκόνη. Πρόκειται και εδώ για έναν εξωθητήρα μονού κοχλίου, του οποίου το κόστος κυμαίνεται από 995 – 1095\$.

Το Noztek Pro. Το Noztek Pro είναι ένας εξωθητής plug and play, που σημαίνει ότι σε μόλις 15 λεπτά μπορεί να είναι εκτός κιβωτίου και έτοιμο για χρήση. Απλώς συνδέεις, ενεργοποιείς τη θερμάστρα και προσθέτεις τη ρητίνη, στη συνέχεια ενεργοποιείς τον κινητήρα και αμέσως αρχίζει η εξώθηση. Χωρίς kit συναρμολόγησης, αυτός ο εξωθητής είναι εξαιρετικά αξιόπιστος απλός και εύχρηστος

Το Noztek Pro εξωθεί στα 2,5 m ανά λεπτό, ανάλογα με τον τύπο του υλικού που εξωθείται. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα 1 Kg νήματος σε περίπου 2 ώρες. Το νήμα που παράγει έχει διάμετρο 1,75 ή 3 mm.



Εικόνα 3.5 : Ο Noztek Pro Filament εξωθητήρας.

Η ζώνη προθερμαντήρα που παρέχεται ως στάνταρ απομακρύνει το μεγαλύτερο μέρος της καταπόνησης από τον κινητήρα, βελτιώνει το ρυθμό εξώθησης και αυξάνει τη μακροζωία.

Αυτός ο προηγμένος εξωθητής έχει δοκιμαστεί χρησιμοποιώντας μια εκτεταμένη γκάμα πολυμερών συμπεριλαμβανομένων των ABS, PLA, PET, PP, HDPE, PP και πολλά άλλα. Οι κονιοποιημένες ρητίνες, οι σύνθετοι συνδυασμοί και οι ανακυκλωμένες πλαστικές σκόνες μπορούν να εξωθούνται χάρη στον ειδικά

κατασκευασμένο βιδωτό σχεδιασμό του. Στην πραγματικότητα, μπορεί να εξωθήσει σχεδόν οτιδήποτε πετιέται σε αυτόν. Μπορείς επίσης να αναμίξεις και να φτιάξεις το δικό σου χρωματιστό νήμα απλώς αναμιγνύοντας στη χοάνη ρητίνη και χρώμα. (<https://www.noztek.com/product/noztek-pro>)

Ο **Filastruder extruder** είναι ένας ακόμα εξηθητήρας μονού κοχλία οικιακής χρήσης (εικόνα 3.6). Εδώ, η απόκλιση της διαμέτρου του filament είναι $1,75 \pm 0,2$ mm και για την παραγωγή 1 kg νήματος απαιτούνται 5 – 8 ώρες. Το κόστος αγοράς αυτού του εξωθητή είναι 299,99\$. (<https://www.filastruder.com/products/filastruder-kit>)



Εικόνα 3.6 : Ο Filastruder extruder εξηθητήρας οικιακής χρήσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΟΙ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΤΗΣ ΕΞΩΘΗΣΗΣ.

4.1 Πυκνότητα.

Το φυσικό μέγεθος πυκνότητα αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της ύλης. Ορίζεται ως το βάρος ανά μονάδα όγκου. Συνήθως μετριέται σε γραμμάρια ανά κυβικό εκατοστό. Ωστόσο, η πυκνότητα όγκου και η πυκνότητα πλαστικού μπορούν να δοθούν σε λίβρες ανά κυβικό πόδι (Harod F.giles, 2005).

Στην εξώθηση είναι κρίσιμες τρεις διαφορετικές πυκνότητες:

- Η πυκνότητα της πρώτης ύλης,
- Η πυκνότητα τήγματος στον εξωθητήρα και
- Η πυκνότητα του στερεού πολυμερούς.

Η ολική πυκνότητα της πρώτης ύλης είναι σημαντική για τον προσδιορισμό του κατά πόσο ενδέχεται να προκύψουν πιθανά προβλήματα τροφοδοσίας. Για παράδειγμα, μία χύδην πυκνότητα κάτω από 320,37 κιλά ανά κυβικό μέτρο καθιστά την πρώτη ύλη μας πολύ αφράτη και μπορεί να μη ρέει καλά από τη χοάνη τροφοδοσίας στο θάλαμο του εξωθητήρα. Αν είναι ελεύθερη ροής, ο όγκος τροφοδοσίας ανά μονάδα χρόνου μπορεί να μειώσει σημαντικά τον αναμενόμενο ρυθμό παραγωγής. (Harod F.giles, 2005)

Η πυκνότητα τήγματος είναι υψηλότερη από την ολική πυκνότητα, καθώς αφαιρείται ο αέρας και ο χώρος που υπάρχει μεταξύ των σωματιδίων στη στερεά κατάσταση. Στην κατάσταση τήξης, η πυκνότητα είναι μικρότερη από το τελικό πλαστικό προϊόν, αφού τα πολυμερή συστέλλονται καθώς μειώνεται η θερμοκρασία. Στο τελικό μέρος, οι μοριακές αλυσίδες είναι στενά συνδεδεμένες μεταξύ τους και αφαιρείται ο αέρας που υπήρχε αρχικά στη χύδην πυκνότητα. Συγκρίνοντας το πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας και χαμηλής πυκνότητας στο ίδιο τμήμα, τα μέρη πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας ζυγίζουν περισσότερο καθώς τα άτομα πολυμερούς και τα μόρια συσσωρεύονται πιο στενά μεταξύ τους στην υψηλότερη κρυσταλλικότητα. Συνεπώς, υπάρχει περισσότερη μάζα ανά μονάδα όγκου. Η πυκνότητα είναι κρίσιμη όταν αγοράζουμε ρητίνες για εξώθηση. Ο όγκος κάποιου μέρους υπολογίζεται με τη λήψη της κυκλικής περιοχής και πολλαπλασιασμού του κατά το μήκος. (Harod F.giles, 2005)

4.2 Δείκτης ροής τήγματος.

Ο δείκτης ροής τήγματος ή MFI ροής είναι ένα μέτρο της ευκολίας ροής του τήγματος ενός πολυμερούς θερμοπλαστικού. Ορίζεται ως η μάζα του πολυμερούς, σε γραμμάρια, που ρέει μέσα σε δέκα λεπτά μέσω ενός τριχοειδούς σωλήνα ειδικής διαμέτρου υπό πίεση που εφαρμόζεται μέσω καθορισμένων βαρών για εναλλακτικές προδιαγραφόμενες θερμοκρασίες. Η μονάδα του στο SI είναι σε g / 10 min. Μπορεί επίσης να βρεθεί με πολλαπλασιασμό της πυκνότητας του πλαστικού σε κατάσταση τήξης και του ρυθμού ροής όγκου τήγματος (MVR melt volume flow rate).

Ο ρυθμός ροής τήγματος είναι ένα έμμεσο μέτρο του μοριακού βάρους, υψηλός ρυθμός ροής τήγματος αντιστοιχεί σε χαμηλό μοριακό βάρος. Την ίδια στιγμή, ο ρυθμός ροής τήγματος είναι ένα μέτρο της ικανότητας του τήγματος του υλικού να ρέει υπό πίεση. Η ταχύτητα ροής τήγματος είναι αντιστρόφως ανάλογη προς το ιξώδες του τήγματος στις συνθήκες της δοκιμής, αν και θα πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι το ιξώδες για οποιοδήποτε τέτοιο υλικό εξαρτάται από την εφαρμοζόμενη δύναμη. (Plastics. Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and the melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics, 2005).

4.3 Τάση.

Η τάση ορίζεται ως δυναμική διαφορά μεταξύ δύο σημείων στο ηλεκτρικό πεδίο. Εάν η τάση είναι υψηλή τότε η ροή του ηλεκτρικού ρεύματος θα είναι επίσης υψηλή. Η τάση είναι επίσης γνωστή ως ηλεκτροκινητική δύναμη. Η τυπική μονάδα τάσης είναι volt και το σύμβολο είναι V. Ένα volt μεταφέρει φορτισμένα ηλεκτρόνια μέσω αντίστασης ενός ohm σε ένα δευτερόλεπτο. Μια τάση παράγει επίσης ηλεκτροστατικό πεδίο, ακόμη και αν δεν υπάρχει ρεύμα. Έτσι, όταν αυξάνεται η τάση, το ηλεκτροστατικό πεδίο γίνεται πιο έντονο. Μια τάση η οποία έχει την ίδια πολικότητα ονομάζεται άμεση τάση. Αν η πολικότητα αντιστρέφει την κατεύθυνση τότε είναι γνωστή ως εναλλασσόμενη τάση. Ένας πλήρης κύκλος σε ένα δευτερόλεπτο ονομάζεται συχνότητα η οποία μετράται γενικά σε hertz. (Rouse, 2005).

4.4 Ρεύμα.

Κάθε ύλη αποτελείται από άτομα που έχουν θετικό πυρήνα και μερικά αρνητικά φορτισμένα άτομα. Το ρεύμα μπορεί να οριστεί ως ροή φόρτισης. Το Coulomb είναι η

τυπική μονάδα ρεύματος και το σύμβολό του είναι το C. Τα πολλαπλά πρωτόνια και ηλεκτρόνια είναι γνωστά ως φορτίο. Σύμφωνα με το νόμο του Coulomb, η επιρροή των φορτίων χαρακτηρίζεται από τις δυνάμεις μεταξύ τους. Ένα φορτίο coulomb είναι το φορτίο που απαιτείται για να ρέει το ρεύμα μέσω ενός λαμπτήρα 120 watts. Ο ρυθμός ροής του ηλεκτρικού φορτίου ονομάζεται ηλεκτρικό ρεύμα και μετριέται σε Αμπέρ (A). (Eiert, 1998–2015)

4.5 Ροπή.

Η ροπή είναι η δύναμη που απαιτείται για την περιστροφή ενός αντικειμένου. Η περιστροφή μπορεί να είναι αξονική. Η δύναμη και η απόσταση μεταξύ των αξόνων λαμβάνονται γενικά κατά τον υπολογισμό της ροπής. Η απόσταση μεταξύ του στροφέα και του άξονα στην οποία οι δυνάμεις επιδρούν ονομάζεται βραχίονας. Ο κινητήρας που έχει υψηλή αντοχή και μπορεί να περιστραφεί παρά τη μεγάλη αντίσταση έχει μεγαλύτερη ροπή. Γενικά, ο κινητήρας μπορεί να αγοραστεί σύμφωνα με την απαιτούμενη ροπή. Η ροπή μπορεί να οριστεί ως:

$$T = r F = r F \sin (\theta). \text{ (Lawrence S. Lerner, 1996) (εξίσωση 1)}$$

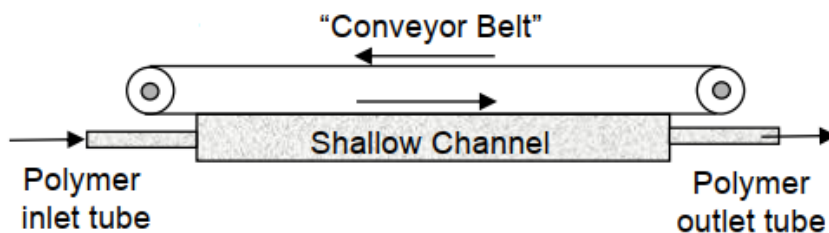
Όπου T=ροπή, r=ακτίνα, F=δύναμη

4.6 Τριβή και πίεση.

Όταν δύο επιφάνειες έρχονται σε επαφή και έχουν κάποια διάβρωση, δημιουργείται μια δύναμη και η δύναμη αυτή ονομάζεται τριβή. Η τριβή εμποδίζει την κίνηση μιας επιφάνειας σε μια άλλη επιφάνεια. Η τριβή δε μπορεί να δημιουργηθεί εάν υπάρχει μόνο μία επιφάνεια, για να δημιουργηθεί τριβή απαιτούνται δύο επιφάνειες. Οι ιδιότητες της επιφάνειας ή η υφή της επιφάνειας επηρεάζουν επίσης τις ιδιότητες της τριβής. Αν η επιφάνεια είναι πολύ τραχιά, τότε θα υπάρξει μεγαλύτερη τριβή. Ένας παράγοντας που επηρεάζει την τριβή είναι επίσης μια δύναμη επαφής που ωθεί τις δύο επιφάνειες μαζί και δημιουργεί τριβή (Wagon, 1998).

Οι μηχανές διέλασης (εξώθησης) κινούν το τηγμένο πολυμερές και παράγουν πίεση χρησιμοποιώντας την οπισθέλκουσα ροή (drag) flow.

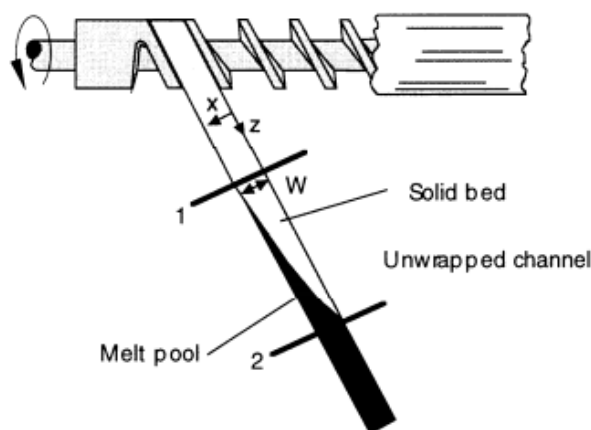
Η κίνηση του πολυμερούς μέσα στο κανάλι του ατέρμονα κοχλία μπορεί να προσομοιωθεί με μια ατέρμονα κινούμενη πλάκα σε επαφή με τα τοιχώματα του καναλιού κίνησης (εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1 : Κίνηση του πολυμερούς μέσα στο κανάλι του ατέρμονα κοχλία

Η τριβή μεταξύ της κινούμενης ταινίας και του πολυμερούς θα μεταφέρει το πολυμερές τήγμα και θα δημιουργεί πίεση καθώς το υλικό θα προσεγγίζει την έξοδο του καναλιού. Η πίεση αυτή θα εξωθεί το τήγμα στο καλούπι (die).

Πρακτικά το αποτέλεσμα της κίνησης του τήγματος επιτυγχάνεται με περιστροφή του ατέρμονα κοχλία μέσα σε ένα σταθερό κυλινδρικό κανάλι (εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.2 : Το αποτέλεσμα της κίνησης του τήγματος.

Οι δυνάμεις τριβής έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση της πίεσης (*pressure rise*) στην περιοχή τροφοδοσίας. Η πίεση αυτή συμπιέζει τα στερεά σωματίδια - στρώμα υλικού - (*solids bed*) το οποίο συνεχίζει να κινείται προς την έξοδο του καναλιού τηκόμενο σταδιακά. Η πίεση που αναπτύσσεται υπολογίζεται από τη σχέση :

$$P = P_0 \exp (\text{const} * f_b - \text{const} * f_s) Z_b \text{ (εξίσωση 2)}$$

όπου

P_o : η πίεση κάτω από τη χοάνη (συνήθως πολύ μικρή),

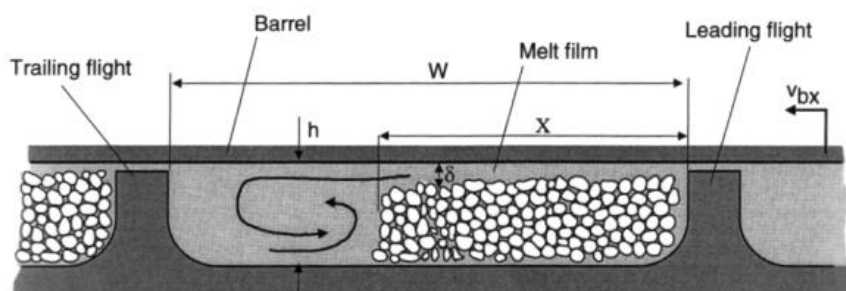
f_b, f_s : συντελεστές τριβής του στερεού σώματος στο βαρέλι και στον κοχλία και

Z_b : η κάτω απόσταση του καναλιού.

Για κίνηση προς τα εμπρός πρέπει $f_b > f_s$.

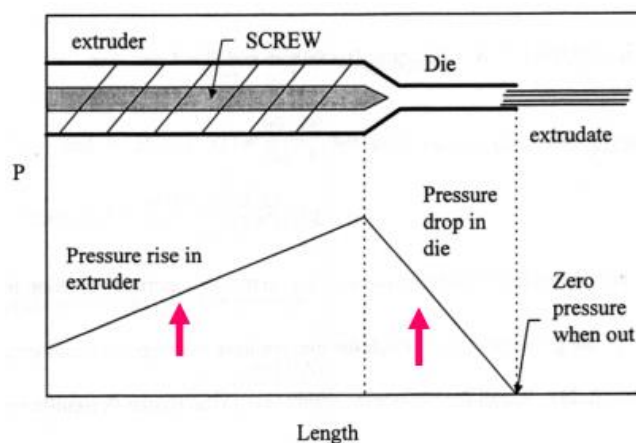
Τα πτερύγια του ατέρμονα πρέπει να έχουν επιφάνεια λεία (για χαμηλό συντελεστή τριβής) ενώ αντίθετα τα τοιχώματα του κυλίνδρου πρέπει να έχουν μεγάλη τραχύτητα για υψηλότερο συντελεστή τριβής.

Η τριβή και η αγωγή θερμότητας από τα τοιχώματα του καναλιού αυξάνουν τη θερμοκρασία του υλικού μέχρι το σημείο τήξης, δημιουργώντας ένα φιλμ στην επιφάνεια του κυλίνδρου. Τελικά, αρχίζει να δημιουργείται μια περιοχή τήξης (a melt pool) στις περιοχές μεταξύ καναλιού και πτερυγίων του ατέρμονα (εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3 : Δημιουργία φιλμ στην επιφάνεια του κυλίνδρου.

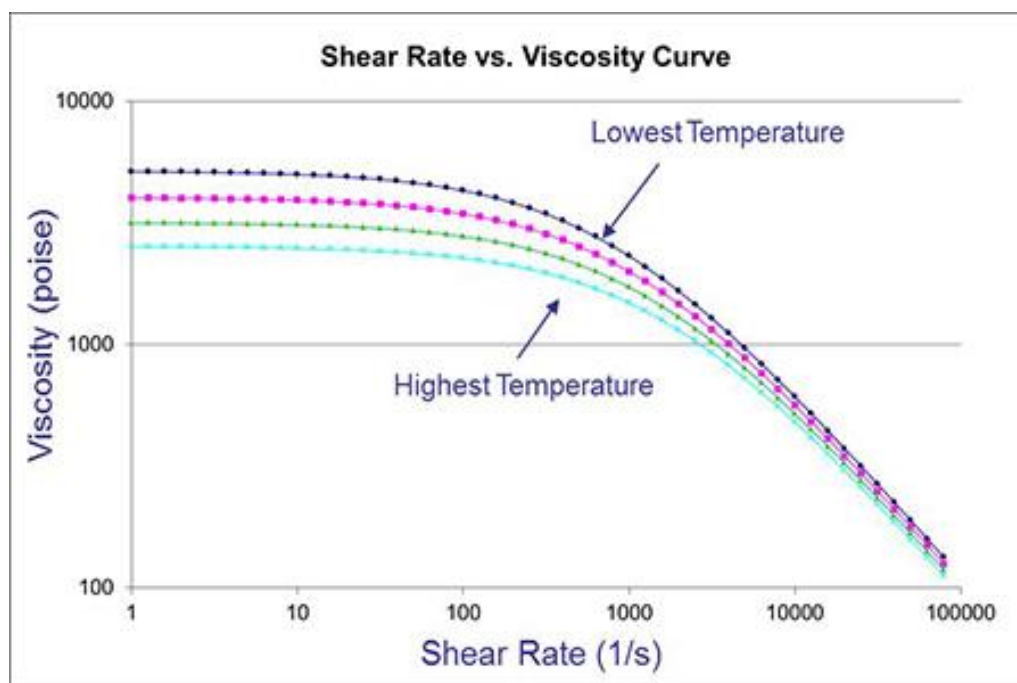
Στους συμβατικούς εξωθητές η μεταβολή της πίεσης που αναπτύσσεται για την κίνηση του υλικού και την εξώθηση του τήγματος φαίνεται στο σχήμα 4.4 που ακολουθεί. Η ροή του τήγματος μπορεί να εκτιμηθεί με επίλυση των εξισώσεων της ροής.



Εικόνα 4.4 : Μεταβολή της πίεσης που αναπτύσσεται για την κίνηση του υλικού και την εξώθηση του τήγματος.

4.7 Ιξώδες.

Το ιξώδες είναι το μέγεθος που περιγράφει την αντίσταση ροής ενός υγρού. Τα ρευστά αντιστέκονται στη σχετική κίνηση των βυθισμένων αντικειμένων μέσα σε αυτά, καθώς και στην κίνηση στρωμάτων με διαφορετικές ταχύτητες μέσα τους. Το ιξώδες (που συμβολίζεται με η) είναι η αναλογία της τάσης διάτμησης (f / A) προς την κλίση ταχύτητας ($\Delta v_x / \Delta z$ ή dv_x / dz) μέσα στο ρευστό.



Εικόνα 4.5 : Γραφική παράσταση ιξώδους έναντι ρυθμού διάτμησης.

Το ιξώδες του πολυμερούς είναι σημαντικό στην εξώθηση για να κατανοήσουμε το στάδιο της επεξεργασίας, το ρόλο που παίζει η θερμοκρασία στο ιξώδες, και τη σημαντικότητα του ρυθμού διάτμησης κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας. Το διάγραμμα ιξώδους - διατμητικής ταχύτητας (εικόνα 4.5), παρουσιάζει μεγάλες διαφορές με τις μεταβολές της θερμοκρασίας και μόνο μικρές διαφορές με τις μεταβολές της διατμητικής ταχύτητας. Συνεπώς για να μειωθεί το ιξώδες κατά τη διάρκεια της εξώθησης, είναι πιο αποτελεσματική η μείωση της θερμοκρασίας τήξης. Η μετάβαση σε υψηλότερο κοχλία είτε σε μηχανές με μονό, είτε με διπλό κοχλία δεν αλλάζει δραματικά το ιξώδες της ρητίνης. Ο υψηλότερος ρυθμός διάτμησης προάγει τη θερμότητα διάτμησης, η οποία μειώνει το ιξώδες του πολυμερούς και μπορεί να οδηγήσει σε αποικοδόμηση της ρητίνης. Ορισμένα συστήματα ρητίνης παρουσιάζουν τόσο ισχυρή θερμοκρασία όσο και ισχυρή εξάρτηση διάτμησης. Σε αυτά τα συστήματα, ενώ τόσο η θερμοκρασία όσο και η διάτμηση έχουν σημαντικές επιδράσεις στο ιξώδες, οι μεταβολές στο ρυθμό διάτμησης επηρεάζουν το ιξώδες περισσότερο από τις μεταβολές της θερμοκρασίας (Harod F.giles, 2005).

4.8 Κινητήρας.

Στους περισσότερους εξωθητήρες χρησιμοποιούμε κινητήρες συνεχούς ρεύματος για την κίνηση του κοχλία. Οι κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος αντικαταστήθηκαν από τους κινητήρες συνεχούς ρεύματος επειδή οι εναλλασσόμενου ρεύματος είναι χωρίς ψήκτρες και ψηφιακή καθοδήγηση. Ο κινητήρας εναλλασσόμενου ρεύματος μπορεί εύκολα να βελτιστοποιηθεί σε τριφασικό σύστημα. Συνήθως συνδέονται με σύστημα τροχαλιών για να κινήσουν τον κοχλία, ανάλογα με τον εξωθητήρα. Ο κινητήρας χρειάζεται τόσο πολύ δύναμη όσο είναι απαραίτητη για να ξεπεραστεί η τριβή στο σύστημα μεταξύ του κοχλία και του κυλίνδρου (Rauwendaal C., 2013).

Οι κινητήρες συνεχούς ρεύματος είναι στις μέρες μας οι ισχυρότεροι κινητήρες. Μπορούν να δώσουν τρεις με τέσσερις και ακόμη και πέντε φορές μεγαλύτερη ροπή στρέψης σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης. Στους κινητήρες συνεχούς ρεύματος η ενέργεια που τροφοδοτείται σε αντίσταση μπορεί να προκαλέσει την εφαρμογή διακοπής σε διάφορα πεδία και τον έλεγχο των περιστροφών. Αυτό αφαιρεί ή μειώνει το μέγεθος των μηχανικών φρένων. Αυτό μπορεί να ελεγχθεί τόσο δεξιόστροφα όσο και αριστερόστροφα και από ανάπαυση σε κίνηση σε σύντομο χρονικό διάστημα, χωρίς τη χρήση διακόπτη τροφοδοσίας. Αυτοί οι κινητήρες μπορούν να λειτουργούν

συνεχώς χωρίς ημερομηνία λήξης. Η περιστροφή ανά λεπτό των κινητήρων αλλάζει στο σύστημα κίνησης.

4.9 Ρουλεμάν.

Το ρουλεμάν εισήχθη στα μέσα της δεκαετίας του 1740 από τον ορολόγο John Harrison για τον H3 ναυτικό χειριστή του χρόνου. Το ρουλεμάν χρησιμοποιείται για να μειώσει την τριβή μεταξύ των κινούμενων μερών στην επιθυμητή κίνηση. Μειώνει την τριβή ελέγχοντας τους φορείς της αντίθετης δύναμης. Στο σύστημα έδρασης του εξωθητήρα περιέχει κυκλικά και αξονικά ρουλεμάν. Ο στόχος αυτού του ρουλεμάν είναι να παρέχει στήριξη αντοχής στον κοχλία, ακόμη και με μεγάλη ταχύτητα (Barr, 1966).

4.10 Όρια και προσαρμογές, διαστασιολόγηση ανοχής.

Κανονικά, όταν τα εξαρτήματα σχεδιάζονται, θα πρέπει να είναι ικανά να προσαρμόζονται. Τα εξαρτήματα δε μπορούν να τοποθετηθούν μαζί εάν δεν προσαρμόζονται εύκολα, αλλιώς μπορεί να δημιουργήσουν προϊόν που μπορεί να προκαλέσει ατυχήματα. Έτσι, υπάρχουν διάφοροι κανόνες στο σχεδιασμό που ορίζει το βασικό μέγεθος, το ονομαστικό μέγεθος ή το μέγεθος του σχεδίου. Η ακρίβεια σχεδιασμού εξαρτάται από τον αριθμό των δεκαδικών μετά τη μέτρηση. Για παράδειγμα, μία μέτρηση 1,2922 mm, σημαίνει ότι η ακρίβεια χρειάζεται πολύ περισσότερο για αυτή την απαιτούμενη διάσταση, ενώ αν το μέγεθος είναι 1,2 mm έχουμε μικρότερη ακρίβεια. Υπάρχουν διάφοροι κανόνες για αύξηση της αποδοτικότητας των διαφόρων εξαρτημάτων. Οι μηχανικοί μπορούν εύκολα να καθορίσουν την ανοχή ώστε να ταιριάζει στον άξονα σε κυκλικές προσαρμογές. Έτσι το βασικό σύστημα εξαρτημάτων χρησιμοποιείται για μεγαλύτερη ακρίβεια. Αυτά είναι τα πράγματα που ο μηχανικός πρέπει να γνωρίζει και να εξετάζει κατά το σχεδιασμό. Το τμήμα συναρμολόγησης δε μπορεί να πετύχει αν δε συμφωνούν αυτά τα όρια και η ανοχή. Επομένως, πρόκειται για τη χρήση τυπικών τιμών κατά τη διάρκεια δημιουργίας και συναρμολόγησης των εξαρτημάτων. (Limits and Fits, Tolerance Dimensioning).

4.11 Ηλεκτρικοί θερμαντήρες.

Οι ηλεκτρικοί θερμαντήρες που χρησιμοποιούνται στον εξωθητήρα έχουν αντικαταστήσει άλλους θερμαντήρες υγρών ή συστήματα θέρμανσης με ατμό. Οι ηλεκτρικές θερμάστρες χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα επειδή είναι πολύ αποτελεσματικές και μειώνουν το κόστος. Η συντήρησή τους δεν είναι δαπανηρή σε σύγκριση με άλλα συστήματα θέρμανσης. Στον εξωθητήρα, εάν η μηχανή εξωθητή είναι μικρή και έχει λιγότερες ζώνες τότε έχει λίγους θερμαντήρες και αν η μηχανή είναι μεγάλη με πολλές ζώνες τότε έχει περισσότερους ηλεκτρικούς θερμαντήρες. Οι ηλεκτρικοί θερμαντήρες συνήθως καλύπτουν μεγαλύτερη περιοχή σε σύγκριση με άλλα συστήματα θέρμανσης. Έχει γίνει ένα φιλικό σύστημα θέρμανσης για τους μηχανικούς στη διαδικασία της εξώθησης. (Rauwendaal C., 2013).

Όταν συγκεκριμένη ποσότητα ρεύματος διέρχεται μέσω του αγωγού έχει κάποια αντίσταση, αυτή η αντίσταση λειτουργεί ως φράγμα στη ροή και παράγει τη θερμότητα. Η θερμότητα που λαμβάνεται από αυτό δίνεται από την εξίσωση 3:

$$QC = I^2 R = VI = V^2 / R \text{ (εξίσωση 3)}$$

όπου: C= χωρητικότητα, R = αντίσταση, Q= ροή φόρτισης, V= Τάση και I= ένταση ρεύματος.

Αυτή η εξίσωση χρησιμοποιείται τόσο σε εναλλασσόμενο όσο και σε συνεχές ρεύμα και εκφράζεται σε RMS (ρίζα μέσου τετραγώνου). Η τριφασική εξίσωση θερμότητας κυκλώματος δίνεται από τον τύπο:

$$QC = 3VI \text{ (εξίσωση 4)}$$

όπου: C= χωρητικότητα, Q= ροή φόρτισης, V= Τάση και I= ένταση ρεύματος.

4.12 Αερόψυξη.

Η διαδικασία ψύξης του νήματος με τη βοήθεια του αέρα είναι η αερόψυξη. Η ψύξη του αέρα μπορεί να γίνει με τη βοήθεια ενός ανεμιστήρα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένας μικρός ανεμιστήρας CPU εάν το νήμα χρειάζεται ψύξη. Αυτό κάνει το λιωμένο πλαστικό νήμα να κρυώσει για να αποφευχθεί η πρόσθετη συρρίκνωση του.

4.13 Ρελέ στερεάς κατάστασης.

Ρελέ στέρας κατάστασης (SSR) (εικόνα 4.6) είναι η συσκευή στην οποία η θερμοκρασία μπορεί να ελεγχθεί με τη βοήθεια του PID, για τον έλεγχο του ηλεκτρικού κυκλώματος για τη διατήρηση της θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία μπορεί να ελεγχθεί ελέγχοντας τον ηλεκτρισμό. Επομένως, αυτή η συσκευή λειτουργεί ως διακόπτης για την ηλεκτρική ενέργεια. Αυτό σημαίνει ότι όταν η θερμοκρασία είναι ανεπαρκής, το SSR θα μεταδώσει ηλεκτρική ενέργεια στο θερμαντήρα και όταν η θερμοκρασία φτάσει στο απαιτούμενο επίπεδο κόβει τον ηλεκτρισμό με τη βοήθεια του PID και του θερμοστάτη. (Metro physics inc, 1964).



Εικόνα 4.6 : Φωτογραφία ενός Ρελέ στερεάς κατάστασης.

4.14 PID controller.

Το PID είναι η συσκευή που παρέχει την πληροφορία στο SSR για το πότε πρέπει να ενεργοποιηθεί και πότε να απενεργοποιηθεί (εικόνα 4.7). Το PID διαβάζει τη θερμοκρασία οποιουδήποτε συστήματος με τη βοήθεια του θερμοστάτη. Λειτουργεί ως πίνακας εισόδου στο σύστημα (Metro physics inc, 1964).



Εικόνα 4.7 : Φωτογραφία ενός PID controller.

Ο γενικός σκοπός των ελεγκτών θερμοκρασίας είναι για τον έλεγχο των πιο τυπικών διαδικασιών στη βιομηχανία. Συνήθως, έρχονται σε μια σειρά μεγεθών DIN, έχουν πολλαπλές εξόδους και προγραμματιζόμενες λειτουργίες εξόδου. Αυτοί οι ελεγκτές μπορούν επίσης να εκτελέσουν έλεγχο PID για άριστες καταστάσεις γενικού ελέγχου. Τοποθετούνται παραδοσιακά στο μπροστινό πίνακα με την οθόνη για εύκολη πρόσβαση από τον χειριστή. Αυτοί οι ελεγκτές έχουν μια λειτουργία προσυntonισμού για τον αρχικό υπολογισμό της θερμοκρασίας PID για μια διαδικασία και μια λειτουργία συνεχούς λήψης για τη συνεχή βελτίωση της θερμοκρασίας PID. Αυτό επιτρέπει γρήγορη εγκατάσταση, εξοικονομώντας χρόνο και μειώνοντας τα απόβλητα. (Total Temperature Instrumentation, Inc., 2015)

4.15 Θερμοστοιχείο.

Ο αισθητήρας που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση της θερμοκρασίας είναι γνωστός ως θερμοστοιχείο (εικόνα 4.8). Αποτελείται από δύο σύρματα κατασκευασμένα από διαφορετικά μέταλλα. Όταν τα δύο υλικά υποβάλλονται στη θερμότητα, παράγει κάποια ηλεκτρική τάση η οποία καθορίζει την ανάγνωση της θερμοκρασίας στο σύστημα. Το θερμοστοιχείο χρησιμοποιείται λόγω χαμηλού κόστους, ανθεκτικότητας και υψηλής αντοχής στην θερμοκρασία. (Metro physics inc, 1964).



Εικόνα 4.8 : Φωτογραφία ενός Θερμοστοιχείου.

4.16 PTC heater.

Ο θερμαντήρας που κατασκευάζεται με τσιπ PTC είναι μία από τις σύγχρονες συσκευές ηλεκτρονικής. Δε χρησιμοποιεί καλώδιο ως αντίσταση αλλά αντί αυτού χρησιμοποιεί έναν αριθμό τσιπς κεραμικών. Κατασκευάζεται από βαρίου τύπου τιτανικό υλικό και μερικά βασικά υλικά ντόπινγκ για την επίτευξη της επιθυμητής αντοχής. Όταν εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση σε ένα τσιπ PTC, η θερμότητα δεν παράγεται με σταθερό ρυθμό. Αντίθετα, καθώς θερμαίνονται τα τσιπ PTC, φτάνουν σε μια σχεδιασμένη θερμοκρασία στην οποία η παραγωγή θερμότητας μειώνεται δραστικά και απαγορεύει στο θερμαντήρα να γίνει θερμότερος. Έτσι, το τσιπ PTC έχει ένα σχεδιασμένο όριο θερμοκρασίας. Τα τσιπ PTC εγγενώς περιορίζουν τη θερμοκρασία του ηλεκτρικού θερμαντήρα απορρόφησης και συνεπώς δεν απαιτούν προστασία από υπερβολική θερμοκρασία. Βασικά η προστασία από την υπερβολική θερμοκρασία ενσωματώνεται στον πυρήνα του θερμαντήρα, προσφέροντας πλεονεκτήματα σε σχέση με τους παραδοσιακούς θερμαντήρες αντίστασης (Dulzer, 2008).

4.17 Kapton tape.

Η ταινία Kapton αποτελείται από φιλμ πολυαμιδίου υψηλής θερμοκρασίας. Αυτή η ταινία πολυαμιδίου χρησιμοποιείται σε διάφορες διαδικασίες ηλεκτρονικής κατασκευής, όπως συγκόλληση, κάλυψη κυκλωμάτων, μονωτικό μετασχηματιστή και πυκνωτών, επικάλυψη σκόνης και άλλες εφαρμογές υψηλής θερμοκρασίας. Η ταινία Kapton περιέχει πολυαμιδικό υλικό και κόλλα σιλικόνης, γεγονός που την καθιστά

επιλογή πολλών μηχανικών, διότι δεν αφήνει υπολείμματα. Είναι πολύ υψηλής αντοχής ταινία που μπορεί να αντέξει μέχρι 260 βαθμούς Κελσίου. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μονωτικό σκοπό στον εξωθητήρα.

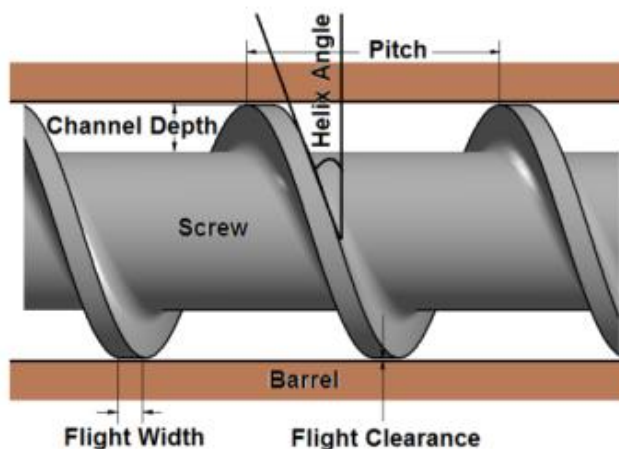
4.18 Αναλογία συμπίεσης.

Ο λόγος του βάθους του καναλιού στη ζώνη τροφοδοσίας και μέτρησης ονομάζεται συμπίεση. Αυτή η αναλογία θεωρείται πολύ σημαντική παράμετρος στον τομέα του σχεδιασμού των κοχλιών. Ο ένας ονομάζεται λόγος συμπίεσης βάθους και ο άλλος ονομάζεται ογκομετρική αναλογία συμπίεσης. Χρησιμοποιούμε το λόγο συμπίεσης αντί για λόγο συμπίεσης βάθους. Ο λόγος συμπίεσης δίνεται από τη σχέση :

$$CR = \text{Βάθος καναλιού στη ζώνη τροφοδοσίας} / \text{βάθος καναλιού στη ζώνη μέτρησης.}$$

(εξίσωση 5)

Όπου, CR = αναλογία συμπίεσης.



Εικόνα 4.9 : Σχηματική απεικόνιση ενός Κοχλία θαλάμου.

Οι κοχλίες θαλάμου (εικόνα 4.9) είναι ειδικοί, επομένως πρέπει να θεωρήσετε ότι η ογκομετρική συμπίεση είναι πιο σημαντική και αξιόπιστη για την παράμετρο σχεδιασμού από τη σχέση συμπίεσης βάθους. Κατά το σχεδιασμό αυτών των κοχλιών, το βήμα αλλάζει επίσης από την τροφοδοσία στις ζώνες μετάβασης και μέτρησης. (Hassan Eslami, 2015)

4.19 Αναλογία μήκους προς διάμετρο.

Η αναλογία μήκους προς διάμετρο (L / D) είναι επίσης ένας από τους σημαντικούς παράγοντες στο σχεδιασμό των κοχλιών. Η αναλογία γενικά βρίσκεται μεταξύ 20 : 1 έως 34 : 1 οποιουδήποτε τύπου κοχλία. Η τελική εφαρμογή του κοχλία είναι υπεύθυνη για τον προσδιορισμό του μήκους του. Έτσι το μήκος του κοχλία εξαρτάται από κάθε στροφή κατά το σχεδιασμό του. Για μια τυπική εξώθηση υπάρχουν τρεις ζώνες :

- η ζώνη τροφοδοσίας,
- η ζώνη συμπίεσης και
- η ζώνη μεταφοράς τήγματος.

Επομένως, ο συμβατικός κοχλίας έχει γενικά λόγο $L / D = 24 : 1$. Εκτός από την εφαρμογή συμβατικών κοχλιών, υπάρχουν και άλλα πεδία εφαρμογής όπου απαιτείται υψηλή πίεση, θερμότητα και σταθερή θερμοκρασία για την επεξεργασία του υλικού. Κατά τη διαδικασία χύτευσης μεμβράνης επίσης, είναι πολύ σημαντικό να έχουμε ομογενοποιημένο και όχι πηκτό μίγμα σε σταθερή θερμότητα και θερμοκρασία. Επομένως για τέτοιες εφαρμογές προστίθενται επιπλέον τμήματα κατά το σχεδιασμό της βίδας. Ο γενικός λόγος L / D για την εξώθηση μεμβράνης είναι 30 : 1 (Hassan Eslami, 2015). Αφού γνωρίζουμε την αναλογία μήκους προς διάμετρο (L / D), μπορούμε να μάθουμε πόσο μήκος έχει ο θάλαμος.

Η αναλογία μήκους προς διάμετρο ορίζεται ως :

$$L / D = \text{μήκος κοχλία} / \text{εξωτερική διάμετρο κοχλία} \text{ (Hassan Eslami, 2015) (εξίσωση 6)}$$

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης μακριών και κοντών εξωθητών δίνονται παρακάτω (πίνακας 1) :

Πίνακας 1 : Πλεονεκτήματα της χρήσης μακριών και κοντών εξωθητών.

ΕΞΩΘΗΤΕΣ ΜΙΚΡΟΥ ΜΗΚΟΥΣ	ΕΞΩΘΗΤΕΣ ΜΕΓΑΛΟΥ ΜΗΚΟΥΣ
Ο απαιτούμενος χώρος δαπέδου είναι μικρότερος	Δυνατότητα περισσότερης ανάμειξης
Χαμηλό αρχικό κόστος επένδυσης	Μπορεί να αντλήσει υψηλότερη πίεση μήτρας
Χαμηλό κόστος ανταλλακτικών εξώθησης	Καλή ικανότητα τήξης με λιγότερη θερμότητα
Απαιτείται μικρότερη ροπή	Περισσότερη αγωγίμη θέρμανση από το θάλαμο
Λιγότερη ιπποδύναμη και μικρό μέγεθος κινητήρα	Η υψηλότερη απόδοση σχετίζεται με το σχέδιο του κοχλία
Η έξοδος σχετίζεται με το L / D του εξωθητήρα	

4.20 Ενεργειακές απαιτήσεις για εξώθηση.

Τα σωματίδια της πρώτης ύλης εισέρχονται στον εξωθητή στη θερμοκρασία δωματίου, τήκονται και στη συνέχεια το τήγμα εξωθείται στην κατάλληλη θερμοκρασία στο καλούπι. Το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας δαπανάται στην περιστροφή του κοχλία. Επίσης ενέργεια δαπανάται στους θερμοστές γύρω από το κανάλι του κοχλία. Η ενέργεια που δαπανάται αντιστοιχεί στην :

- Αύξηση της θερμοκρασίας από τη θερμοκρασία δωματίου στη θερμοκρασία εξώθησης.
- Τήξη του πολυμερούς (heat of fusion) και
- Άντληση του τηγμένου πολυμερούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.

Όπως αναφέρθηκε και στο Κεφάλαιο 1 (Εισαγωγή), ένας από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας είναι και η βελτιστοποίηση της υπάρχουσας μηχανής εξώθησης (extruder) του Εργαστηρίου Μηχανολογίας Ακριβείας και Αντίστροφης μηχανικής του ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ. Ηρακλείου Κρήτης. Στην εικόνα που ακολουθεί (εικόνα 5.1) φαίνεται η μηχανή εξώθησης του εργαστηρίου.



Εικόνα 5.1 : Η μηχανή εξώθησης του εργαστηρίου.

Παρατηρήσεις κατά την παραλαβή του μηχανήματος :

- Ο θερμαντήρας θαλάμου (εικόνα 5.2) λειτουργεί κανονικά (φτάνει την επιθυμητή θερμοκρασία).
- Λειτουργούν και οι τέσσερεις (4) ψυκτήρες.
- Ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί κανονικά.



Εικόνα 5.2 : Φωτογραφία του Θερμαντήρα θαλάμου.

- Στο σύστημα μετάδοσης της κίνησης παρατηρήθηκαν τα εξής :
 - Οι τροχαλίες δεν είναι τοποθετημένες στο ίδιο επίπεδο με αποτέλεσμα η κίνηση να κάνει μικρές διακοπές (τακ – τακ).
 - Η αλυσίδα βγαίνει από τα γρανάζια (εάν τοποθετηθεί ένας οδηγός φτιάχνεται).
 - Ο άξονας του extruder δεν είχε πατούρα με αποτέλεσμα η τροχαλία να τον έχει φθείρει (πρέπει να δημιουργηθεί ή μία πατούρα ή μία τρύπα να μπαίνει η αλυσίδα της τροχαλίας). (εικόνα 5.3)



Εικόνα 5.3 : Φθαρμένος άξονας του εξωθητή.

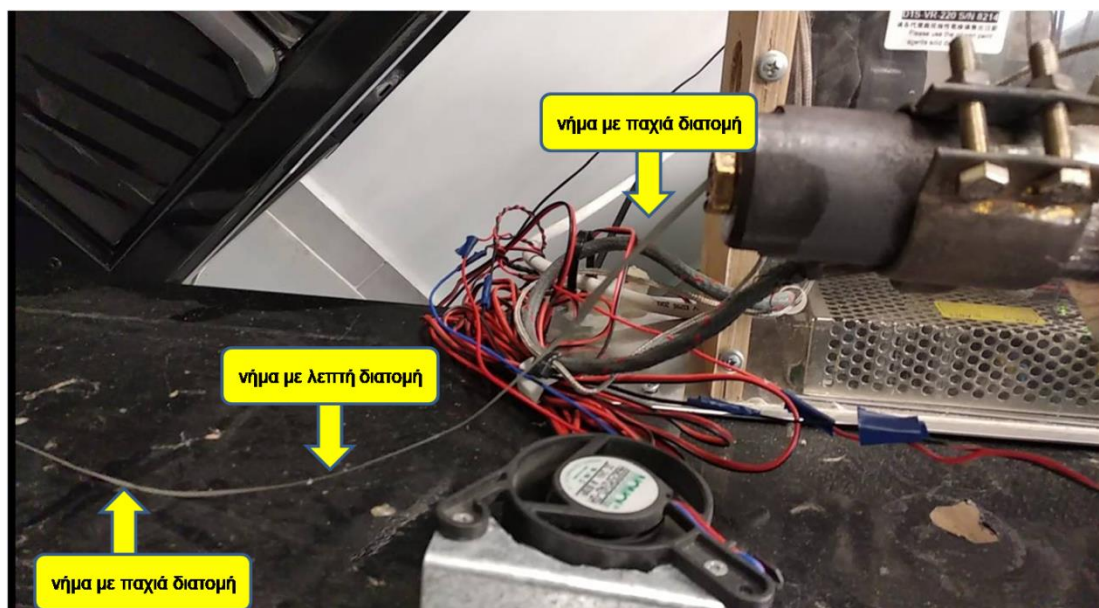
- Ο άξονας είχε κολλήσει (δεν κινούταν) λόγω ενός στερεού υλικού που είχε κολλήσει στον κοχλία μέσα στο θάλαμο.
- Η τροχαλία (με ιμάντα) που θα αντικαταστήσει την προηγούμενη είναι πολύ μεγάλη σε μέγεθος με αποτέλεσμα :
 - α) να δημιουργηθεί ίσως πρόβλημα στον άξονα του εξωθητή λόγω βάρους και
 - β) ο ηλεκτροκινητήρας πρέπει να βγει έξω από τη βάση και πλάγια αυτής για να καταφέρει να ρυθμιστεί, να «τεντώσει» ο ιμάντας.
- Η τροχαλία του ηλεκτροκινητήρα δεν έχει σπείρωμα για να βιδώσει στον άξονα του ηλεκτροκινητήρα.
- Η τροχαλία του άξονα του extruder δεν έχει τρύπα για κάποια βίδα που να τον σταθεροποιήσει. (εικόνα 5.4)



Εικόνα 5.4 : Η τροχαλία του άξονα του extruder.

Εντοπισμός προβλήματος.

Η διατομή του υλικού (νήματος) που παράγεται αυξομειώνεται περιοδικά (λεπτό – παχύ – λεπτό). (εικόνα 5.5)

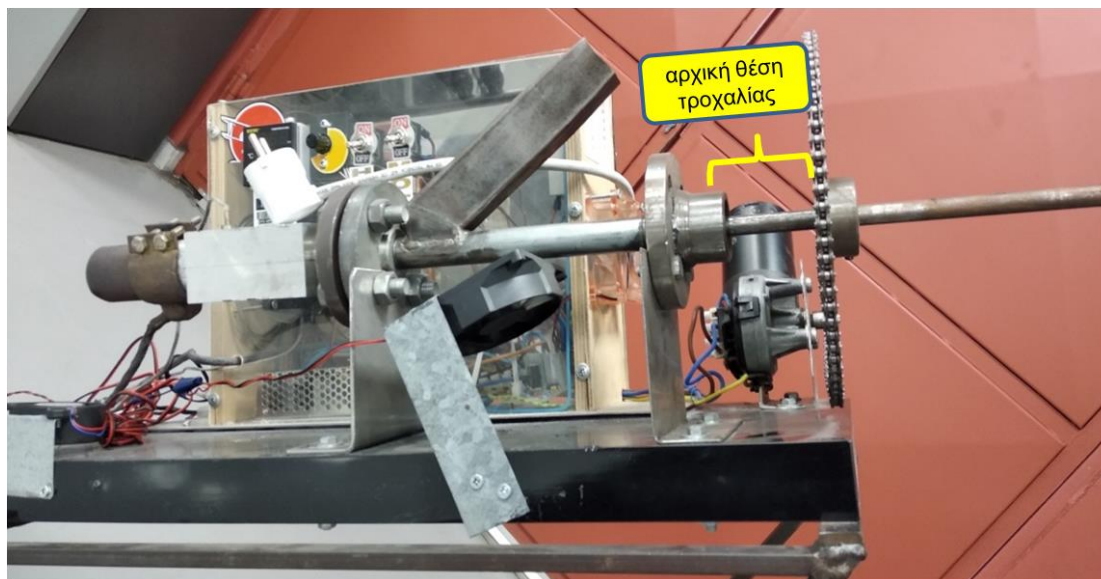


Εικόνα 5.5 : Διατομή υλικού λεπτό – παχύ – λεπτό.

Προσπάθεια αντιμετώπισης του προβλήματος.

Κατά τη διάρκεια των δοκιμών παρατηρήθηκε ότι η τροχαλία του άξονα του εξωθητή γύριζε τρελά ακόμα και σε θερμοκρασία 190°C (που είναι η μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας). Αυτό συνέβη επειδή χωρίς πατούρα η αλινόβιδα της τροχαλίας δε μπορεί να φέρει αντίσταση οπότε :

- Μετακινήθηκε η τροχαλία του άξονα του extruder πίσω εκεί που υπήρχε μία παλιά πατούρα. (εικόνα 5.6α, 5.6.β)
- Μετακινήθηκε ο ηλεκτροκινητήρας ούτως ώστε οι δύο τροχαλίες να έρθουν στο ίδιο επίπεδο ανοίγοντας καινούργιες τρύπες στη βάση.
- Τοποθετήθηκε ο ηλεκτροκινητήρας σε τέτοια θέση ώστε να τεντώνεται η αλυσίδα όπως πρέπει για να μη βγαίνει.



Εικόνα 5.6 : α. Αρχική θέση της τροχαλίας του άξονα του extruder.



Εικόνα 5.6. :β. Τελική θέση της τροχαλίας του άξονα του extruder.

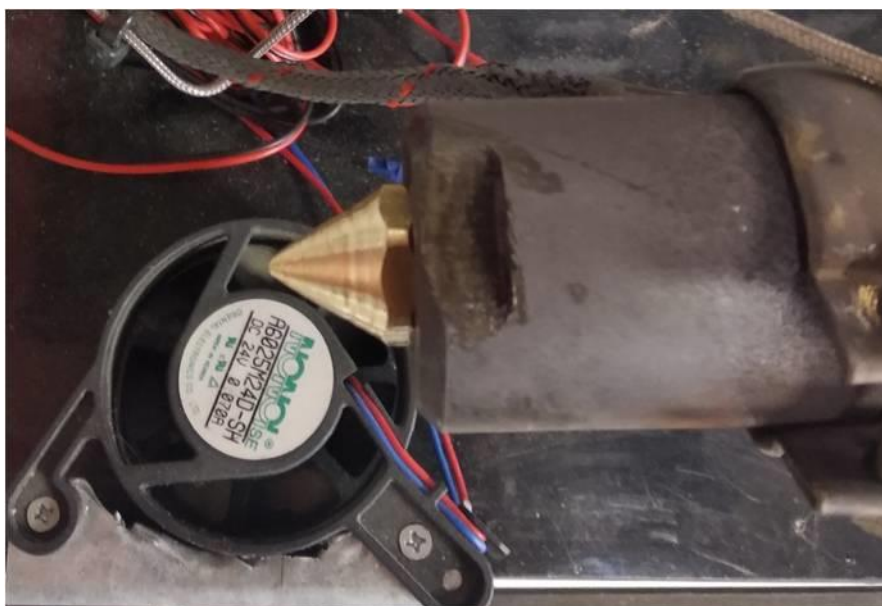
Μετά από αυτές τις διορθώσεις, συνεχίστηκαν οι δοκιμές, όμως, με τη δύναμη που αναπτύχθηκε κουνήθηκε το μοτέρ και ο εξωθητής με αποτέλεσμα η αλυσίδα να χαλαρώσει και πάλι. Φτιάχτηκε μία πρόχειρη κατασκευή, πατέντα, έτσι ώστε η αλυσίδα να μη βγαίνει και συνεχίστηκαν οι δοκιμές με ασφάλεια. (εικόνα 5.7)



Εικόνα 5.7: Πατέντα με την οποία η αλυσίδα παραμένει σταθερή στη θέση της.

Παρατηρήθηκε ότι ο άξονας γυρίζει με σταθερό ρυθμό. Από αυτό συμπεραίνεται ότι ο τρόπος μετάδοσης της κίνησης (αλυσίδα) δεν ευθύνεται για τις αυξομειώσεις στη διατομή του νήματος, οπότε δεν είναι απαραίτητη η μετατροπή του σε ιμάντα.

Μία νέα ιδέα είναι να αντικατασταθεί η σπή με μία νέα κωνική (εικόνα 5.8), όπου το ιξώδες θα συσσωρεύεται εκεί προτού βγει και το νήμα θα βγαίνει με σταθερή διατομή.



Εικόνα 5.8 : Η νέα κωνική σπή (ακροφύσιο εξωθητήρα)..

Τα ακροφύσια ποικίλλουν σε μεγάλο βαθμό στην ποιότητα και την απόδοση. Τα δύο κύρια σημεία που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή ενός ακροφυσίου είναι η διάμετρος του σημείου ακροφυσίου και το υλικό κατασκευής. Τα λειαντικά ή κολλώδη νήματα μπορούν εύκολα να μπλοκαριστούν σε ένα ακροφύσιο που είναι πολύ μικρό, πολύ μεγάλο ή κατασκευασμένο από λάθος υλικό. Όσον αφορά στο μέγεθος, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η ανάλυση επιπέδου που στοχεύεται, καθώς και η ταχύτητα εκτύπωσης. Ένα φαρδύτερο ακροφύσιο εκτυπώνει γρηγορότερα παχύτερα στρώματα. Ένα λεπτότερο σημείο ακροφυσίου εκτυπώνει μικρότερα, πιο εκλεπτυσμένα στρώματα με πιο αργό ρυθμό. Πρέπει να συνυπολογίζονται οι ταχύτητες τροφοδοσίας νήματος, καθώς και η θερμοκρασία θερμού άκρου, όταν αλλάζονται οι διαμέτροι του ακροφυσίου. Το άλλο θέμα είναι το υλικό των ακροφυσίων. Τα φθηνότερα ακροφύσια τείνουν να είναι κατασκευασμένα από ορείχαλκο και είναι πολύ καλά για χρήση με PLA και μερικές φορές ABS. Υπάρχουν ωστόσο και ακροφύσια κατασκευασμένα από μέταλλα υψηλότερης ποιότητας, όπως χάλυβα ή καρβίδιο βολφραμίου.

Το ακροφύσιο κατασκευάστηκε από μια εξάγωνη ράβδο 18 mm με τη βοήθεια τόννου (εικόνα 5.9). Η οπή έχει διάμετρο 1,5 mm



Εικόνα 5.9 : Κατασκευή ακροφυσίου στον τόννο.

Αφού αντικαταστάθηκε η σπή με τη νέα κωνική, τέθηκε πάλι σε λειτουργία ο εξωθητήρας (όλες οι υπόλοιπες παράμετροι διατηρήθηκαν σταθερές). Αυτό που παρατηρήθηκε ήταν ότι το νήμα έβγαινε με σταθερή διατομή. (εικόνα 5.10, εικόνα 5.11)



Εικόνα 5.10 : Νήμα μετά την αντικατάσταση του ακροφυσίου.



Εικόνα 5.11 : Η διατομή του νήματος.

Από την εικόνα 5.11 παρατηρήθηκε ότι η διατομή του νήματος είναι σταθερή και ίση με $1,78 \text{ mm}$ που είναι μέσα στα επιτρεπτά όρια ($1,75 \pm 0,05 \text{ mm}$).

Παρόλο που επιτεύχθηκε παραγωγή νήματος με σταθερή διατομή, παρατηρήθηκε ότι κάποιες φορές, μετά από ένα χρονικό διάστημα λειτουργίας του εξωθητήρα, το μπροστινό κομμάτι του θαλάμου άρχισε να βγαίνει (εικόνα 5.12).



Εικόνα 5.12 : Μπροστινό κομμάτι του εξωθητήρα που βγαίνει κατά τη λειτουργία.

Το συγκεκριμένο πρόβλημα δεν είχε εμφανιστεί με το παλιό ακροφύσιο. Εικάζεται ότι επειδή το καινούργιο ακροφύσιο είναι κωνικό με διατομή $1,5 \text{ mm}$ αυξήθηκε η πίεση κατά την έξοδο του υλικού, κάτι το οποίο δε συνέβαινε πριν, μιας και η οπή του παλιού ακροφυσίου λόγω χρήσης είχε “χαλαρώσει”.

Αφού καθαρίστηκε ο κοχλίας και ο θάλαμος από το τηγμένο υλικό, προκειμένου να επαναποθετηθούν στον εξωθητήρα και να συνεχιστεί η παραγωγική διαδικασία του νήματος, διαπιστώθηκε ότι τα πάσα του θαλάμου είχαν φθαρεί και για αυτό το λόγο έβγαινε με σχετικά υψηλή ευκολία από τη θέση του (εικόνα 5.13)



Εικόνα 5.13 : Φωτογραφίες από τα φθαρμένα πάσα του θαλάμου.

Μία μελλοντική βελτίωση του εξωθητήρα θα μπορούσε να είναι η αλλαγή των φθαρμένων πασών του θαλάμου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.

Τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία είναι τα εξής :

- Διαπιστώθηκε, με τις δοκιμές που έγιναν, ότι η βελτίωση του ακροφυσίου είχε σημαντική επιρροή στην ποιότητα του παραγόμενου νήματος και η αντικατάστασή του από ένα νέο κωνικό ήταν τελικά απαραίτητη.
- Η διατομή του νήματος που παράγει τώρα η μηχανή είναι 1,78 mm. Κυμαίνεται, δηλαδή, σε επιτρεπτή τιμή για να χρησιμοποιηθεί από 3D εκτυπωτή - που είναι και ο σκοπός της εργασίας.
- Παρατηρήθηκε ότι με τις μετατροπές που έγιναν, το σύστημα κίνησης λειτουργεί σωστά, καθώς ο άξονας του εξωθητή γυρνάει με σταθερό ρυθμό και οι στροφές του κινητήρα αυξομειώνονται ανάλογα με το πως θα το ρυθμίσουμε.
- Η χρήση εξωθητών νήματος DIY μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος εκτύπωσης με τρισδιάστατους εκτυπωτές (ανακύκλωση υλικού κτλ.).
- Μια πιθανή μελλοντική βελτίωση της μηχανής θα ήταν σε μηχανουργείο να φτιαχτούν τα πάσα στο μπροστινό κομμάτι του θαλάμου, ούτως ώστε να μη βγαίνουν κατά τη λειτουργία του, όταν ασκείται μεγάλη πίεση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.

1. **Barr**, R. (1966). *Modern Palstics*.
2. **Crawford**, R. (2005). *Plastics Engineering*. (Elsevier, Ed.) Burlington, USA : Butterworth-Heinemann.
3. **Crowther**, B. (1998). *Rubber Extrusion: Theory and Development* (Vol. 9). (R. Dolbey, Ed.) United Kingdom: Rapra technology LTD.
4. **Dulzer**, E. (2008). *Process technology* (<http://www.processtechnology.com/>: <http://www.processtechnology.com/pdf/SmartOnearticle.pdf>)
5. **Elert**, G. (1998–2015). *The Physics Hypertextbook™*. United States. (<http://physics.info/viscosity/>)
6. **Harod F.giles**, J. R. (2005). *Extrusion the definitive processing guide and handbook*. New York, USA: william andrew.
7. **Hassan Eslami**, P. (2015). *Macro advanced extrusion systems*. (Macro Engineering and Technology)
8. **Lawrence S. Lerner**. (1996). *Physics: for scientists and engineers* . Jones & Bartlett Learning.
9. **Metro physics inc**. (1964). *Solid State Thermostat*. Quaterly progress report, National aeronautics and space administration, santabarbara,california. doi:NAS: 8-11625
10. **Plastics. Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and the melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics**. (2005). British Standard Institute
11. **Rauwendaal**, C. (2013). *Polymer Extrusion* (5 ed.). Cincinnati, USA: Hanser Publications.
12. **Rouse**, M. (2005). (<http://whatis.techtarget.com/definition/voltage>)
13. **SAKAI**, T. (2013). *POLIMERY* (58 ed.). Japan: Campus Innovation Center. doi:DOI: dx.doi.org/10.14314/polimery.2013.847
14. **Total Temperature Instrumentation**, Inc. (2015). *Temperature Controller Basics Handbook*. Temperature Controller Basics Handbook|instruments: (<https://www.instrumart.com/pages/283/temperature-controller-basics-handbook>)
15. **Wagon**, S. J. (1998). Force of friction : (<http://regentsprep.org/REGENTS/PHYSICS/PHYS01/FRICTION/DEFAULT.HTM>)
16. <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoplastic>
17. https://el.wikipedia.org/wiki/Τρισδιάστατη_εκτύπωση

18. <http://digilib.teiemt.gr/jspui/bitstream/123456789/1473/1/012010031.pdf>
19. https://en.wikipedia.org/wiki/Lyman_filament_extruder)
20. <https://www.noztek.com/product/noztek-pro>
21. <https://www.filastruder.com/products/filastruder-kit>

Κατάλογος Εικόνων.

Εικόνα 1.1 : Σχηματική απεικόνιση διαδικασίας εξώθησης.	3
Εικόνα 1.2 : Διάφορα προϊόντα 3D εκτυπωτών.	6
Εικόνα 2.1 : Μορφή ενός εξωθητήρα το 1948.	7
Εικόνα 2.2 : Σχηματική απεικόνιση του πρώτου US extruder από τους John Royle & Sons (πατέντα του 1885).	8
Εικόνα 2.3 : Σχηματική απεικόνιση των 6 σταδίων επεξεργασίας κατά τη διαδικασία εξώθησης.	10
Εικόνα 2.4 : Χοάνη τροφοδοσίας μέσω της οποίας φθάνουν οι κόκκοι στο σύστημα.	11
Εικόνα 2.5 : Κυλινδρικός θάλαμος δια μέσου του οποίου εισέρχεται το τετηγμένο υλικό στις σπές του καλουπιού.	12
Εικόνα 2.6 : Κοχλίας που ωθεί το υλικό που τροφοδοτείται στο σύστημα από τη χοάνη.	13
Εικόνα 2.7 : Μήτρα, μια βασική μονάδα του εξωθητήρα.	14
Εικόνα 2.8 : Μονάδα ελέγχου. Σε αυτή είναι συνδεδεμένη η κάθε συσκευή για να λειτουργεί.	14
Εικόνα 3.1 : Σχηματική αναπαράσταση Εξωθητήρα μονού κοχλίου.	15
Εικόνα 3.2 : Σχηματική αναπαράσταση Εξωθητήρα διπλού κοχλίου.	16
Εικόνα 3.3 : Σχηματική αναπαράσταση Εξωθητήρα πολλαπλών κοχλίων.	17
Εικόνα 3.4 : Ο εξωθητής νήματος Lyman.	18
Εικόνα 3.5 : Ο Noztek Pro Filament εξωθητήρας.	19
Εικόνα 3.6 : Ο Filastruder extruder εξωθητήρας οικιακής χρήσης.	20
Εικόνα 4.1 : Κίνηση του πολυμερούς μέσα στο κανάλι του ατέρμονα κοχλίου.	24
Εικόνα 4.2 : Το αποτέλεσμα της κίνησης του τήγματος.	24
Εικόνα 4.3 : Δημιουργία φιλμ στην επιφάνεια του κυλίνδρου.	25

Εικόνα 4.4 : Μεταβολή της πίεσης που αναπτύσσεται για την κίνηση του υλικού και την εξώθηση του τήγματος.	26
Εικόνα 4.5 : Γραφική παράσταση ιξώδους έναντι ρυθμού διάτμησης.	26
Εικόνα 4.6 : Φωτογραφία ενός Ρελέ στερεάς κατάστασης.	30
Εικόνα 4.7 : Φωτογραφία ενός PID controller.	31
Εικόνα 4.8 : Φωτογραφία ενός Θερμοστοιχείου.	32
Εικόνα 4.9 : Σχηματική απεικόνιση ενός Κοχλία θαλάμου.	33
Εικόνα 5.1 : Η μηχανή εξώθησης του εργαστηρίου.	36
Εικόνα 5.2 : Φωτογραφία του Θερμαντήρα θαλάμου.	37
Εικόνα 5.3 : Φθαρμένος άξονας του εξωθητή.	37
Εικόνα 5.4 : Η τροχαλία του άξονα του extruder.	38
Εικόνα 5.5 : Διατομή υλικού παχύ – λεπτό – παχύ.	39
Εικόνα 5.6 α : Αρχική θέση της τροχαλίας του άξονα του extruder.	40
Εικόνα 5.6 β : Τελική θέση της τροχαλίας του άξονα του extruder.	40
Εικόνα 5.7 : Πατέντα με την οποία η αλυσίδα παραμένει σταθερή στη θέση της.	41
Εικόνα 5.8 : Η νέα κωνική οπή (ακροφύσιο εξωθητήρα).	41
Εικόνα 5.9 : Κατασκευή ακροφυσίου στον τόρνο.	42
Εικόνα 5.10 : Νήμα μετά την αντικατάσταση του ακροφυσίου.	43
Εικόνα 5.11 : Η διατομή του νήματος.	43
Εικόνα 5.12 : Μπροστινό κομμάτι του εξωθητήρα που βγαίνει κατά τη λειτουργία.	45
Εικόνα 5.13 : Φωτογραφίες από τα φθαρμένα πάσα του θαλάμου.	46