

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ



ΤΙΤΛΟΣ ΠΤΥΧΙΑΚΗΣ

«Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων τρισδιάστατα εκτυπωμένων
δοκιμίων πολυγαλακτικού οξέως με επεξεργασία σε
θερμοπρέσα»



ΤΗΣ ΦΟΙΤΗΤΡΙΑΣ: ΓΕΩΡΓΙΑΣ ΞΕΒΕΛΟΝΑΚΗ

A.M. : TM 6548

ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΕΣ: ΔΡ. ΒΙΔΑΚΗΣ ΝΕΚΤΑΡΙΟΣ

ΔΡ. ΠΕΤΟΥΣΗΣ ΜΑΡΚΟΣ

Ηράκλειο 2023







ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η πτυχιακή μου εργασία με τίτλο «Βελτίωση μηχανικών ιδιοτήτων τρισδιάστατα εκτυπωμένων δοκιμίων πολυγαλακτικού οξέως με επεξεργασία σε θερμοπρέσα», ολοκληρώθηκε και έτσι κλείνει ο κύκλος των φοιτητικών μου χρόνων επίσημα. Το πείραμα της εργασίας μου πραγματοποιήθηκε στο εργαστήριο Μηχανολογίας Ακρίβειας, Αντίστροφης Μηχανικής και Εκβιομηχανικής στο τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους υπεύθυνους καθηγητές της εργασίας μου, τους κυρίους Δρ. Βιδάκη Νεκτάριο και Δρ. Πετούση Μάρκο που με βοήθησαν σε όλο το ταξίδι της εργασίας με τις γνώσεις και την στήριξη τους.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Διδάκτορα κ. Μουντάκη Νικόλαο για το χρόνο που αφιέρωσε για να με βοηθήσει με την εργασία μου καθώς και για την υπομονή του.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Κανελλοπούλου Σωτηρία, η οποία πραγματοποιούσε την πρακτικής της στο εργαστήριο, για την άψογη συνεργασία που είχαμε καθ' όλη τη διάρκεια της διεξαγωγής του πειράματος.

Το τελευταίο αλλά το πιο σπουδαίο ευχαριστώ το χρωστάω στην οικογένεια μου, αφού χωρίς εκείνους δεν θα είχα φτάσει ως εδώ.



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<u>ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ</u>	4
<u>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ</u>	5
<u>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ</u>	8
<u>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ</u>	9
<u>ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΑΤΩΝ</u>	9
<u>ΠΕΡΙΛΗΨΗ</u>	11
<u>ABSTRACT</u>	12
<u>ΕΙΣΑΓΩΓΗ</u>	13
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ</u>	15
<u>1.1. Ορισμός Πολυμερών</u>	15
<u>1.2. Ιστορική αναδρομή</u>	15
<u>1.3. Δομή του μορίου και επίδραση του μεγέθους του στο πολυμερές</u>	16
<u>1.4. Μορφές αλυσίδων</u>	17
<u>1.5. Πολυμερικές αντιδράσεις</u>	18
<u>1.6. Κατάταξη πολυμερών</u>	20
<u>1.7. Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες πολυμερών</u>	27
<u>1.8. Βιοαποικοδομήσιμα πολυμερή</u>	28
<u>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΟΛΥΓΑΛΑΚΤΙΚΟΥ</u>	
<u>ΟΞΕΟΣ (PLA)</u>	32
<u>2.1. Χαρακτηριστικά πολυγαλακτικού οξέος</u>	32
<u>2.2. Ιστορία και ιδιότητες PLA</u>	33
<u>2.3 Σύνθεση PLA</u>	35



2.4 Εφαρμογές	39
2.5 Πλεονεκτήματα	40
2.6 Μειονεκτήματα	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΜΕ ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ ΣΕ EXTRUDER	44
3.1. Αρχή λειτουργίας	44
3.2. Πλεονεκτήματα	45
3.3 Μειονεκτήματα	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ FDM	47
4.1 Ορισμός τρισδιάστατης εκτύπωσης	47
4.2 Ταξίδι ως το σήμερα...	47
4.3 Fused Deposition Modeling (FDM)	48
4.3.1 Διαδικασία, υλικά και περιοχές εφαρμογής	48
4.3.2 Δυνατά σημεία και αδυναμίες	50
4.3.3 Πλεονεκτήματα FDM	51
4.3.3 Μειονεκτήματα FDM	54
4.4 Άλλες κατηγορίες τρισδιάστατης εκτύπωσης	56
4.4.1 SELECTIVE LASER SINTERING (SLS)	56
4.4.2 STEREO LITHOGRAPHY (SLA)	59
4.4.3 PHOTOPOLYMER JETTING (POLYJET)	64
4.4.4 SELECTIVE LASER MELTING (SLM)	65
4.4.5 ELECTRON BEAM MELTING (EBM)	66
4.4.6 ELECTRON BINDER JETTING	67
4.5 Εφαρμογές Μεθόδου	68



4.6 Πλεονεκτήματα	68
4.7 Μειονεκτήματα	69
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΔΙΕΘΝΗ ΠΡΟΤΥΠΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ	71
5.1 Πρότυπο εφελκυσμού	71
5.2 Πρότυπο κάμψης	72
5.3 Πρότυπο μικροσκληρότητας	72
5.4 Πρότυπο κρούσης	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : ΘΕΡΜΟΠΡΕΣΑ (HOT PRESS MACHINE)	74
6.1 Τι είναι η εργαστηριακή μηχανή θερμής πίεσης	74
6.2 Εφαρμογή	74
6.3 Επιλογή	75
6.3 Τρόποι συντήρησης	76
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο : ΚΑΜΨΗ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ	78
6.1 Ορισμός κάμψης	78
6.2 Εσωτερικές τάσεις	78
6.2 Κάμψη τριών σημείων	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο: ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	98
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	102



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Τέσσερις βασικές δομές πολυμερών	17
Εικόνα 2: Πολυμερισμός προσθήκης και πολυσυμπύκνωσης	19
Εικόνα 3: Φυσικά Πολυμερή	22
Εικόνα 4: Συνθετικά Πολυμερή	22
Εικόνα 5: Κύκλος βιοδιασπώμενων πολυμερών	31
Εικόνα 6: Τομείς που χρησιμοποιείται το πολυγαλακτικό οξύ	39
Εικόνα 7: Μέρη ενός extruder	45
Εικόνα 8: Μέθοδος FDM	49
Εικόνα 9: Μέθοδος SLS	57
Εικόνα 10: Μέθοδος SLA	60
Εικόνα 11: Θερμοπρέσσα	74
Εικόνα 12: Κάμψη τριών σημείων	78
Εικόνα 13: Κάμψη τριών σημείων	79
Εικόνα 14: Ζυγισμένο PLA	80
Εικόνα 15: Το ζυγισμένο υλικό στο φούρνο	81
Εικόνα 16: Οι τέσσερις ζώνες θέρμανσης	82
Εικόνα 17: το παραγόμενο νήμα	82
Εικόνα 18: 3D Eno Composer 450	83
Εικόνα 19: 3D Eno Composer 450	83
Εικόνα 20: Στιγμιότυπο εκτύπωσης	84
Εικόνα 21: Στιγμιότυπο εκτύπωσης	84
Εικόνα 22: Εκτυπωμένη πλάκα PLA	85
Εικόνα 23: Εκτυπωμένη πλάκα PLA	85
Εικόνα 24: Θερμοπρέσσα	86
Εικόνα 25: Θερμοπρέσσα	86
Εικόνα 26: Ρυθμίσεις	87
Εικόνα 27: Η πλάκα PLA στη θερμοπρέσσα	87



Εικόνα 28: Πλάκα μετά τη χρήση της θερμοπρέσσας	88
Εικόνα 29: Πλάκα 1.5mm	88
Εικόνα 30: Πλάκα 1.5mm	89
Εικόνα 31: Πλάκα 1.5mm	89
Εικόνα 32: Πλάκα 2mm	90
Εικόνα 33: Λαμάκια για την κόψη των δοκιμίων	90
Εικόνα 34: Δοκίμια 1.5mm πάχους	91
Εικόνα 35: Δοκίμια 2mm πάχους	91
Εικόνα 36: Imada MX2 κατά το πείραμα	92
Εικόνα 37: Imada MX2 κατά το πείραμα	93
Εικόνα 38: Imada MX2 κατά το πείραμα	93
Εικόνα 39: Η συσκευή Imada MX2	94
Εικόνα 40: Δοκιμασμένα δοκίμια	95
Εικόνα 41: Δοκιμασμένα δοκίμια	95
Εικόνα 42: Δοκιμασμένα δοκίμια	96
Εικόνα 43: Δοκιμασμένα δοκίμια	96
Εικόνα 44: Δοκιμασμένα δοκίμια	97

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Μέγιστη εφελκυστική αντοχή	98
Πίνακας 2: Συντελεστής ελαστικότητας	99
Πίνακας 3: Μετρήσεις σκληρότητας υλικού	100

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΔΙΑΓΡΑΜΑΤΩΝ

Διάγραμμα 1: Μέγιστη εφελκυστική αντοχή	99
Διάγραμμα 2: Συντελεστής ελαστικότητας	100



Διάγραμμα 3: Μετρήσεις σκληρότητας υλικού..... 101

Διάγραμμα 4: Συνολικά αποτελέσματα 101



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα πολυμερή αποτελούν μια ομάδα υλικών, η οποία τα τελευταία χρόνια έχει πάρει τη θέση κλασικών υλικών με παραδοσιακές εφαρμογές. Από την εποχή των αρχαίων Ελλήνων, των Αιγυπτίων και των Αζτέκων τα πολυμερή βρίσκονται στην καθημερινή ζωή του ανθρώπου, ασχέτως αν έχουν βρει συστηματική χρήση τον τελευταίο αιώνα, λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης της επιστήμης. Οι επιστήμονες έχουν δείξει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στην κατηγορία των υλικών αυτή, καθώς αυτά τα υλικά παρουσιάζουν ιδιαίτερες φυσικομηχανικές ιδιότητες και παρουσιάζουν μεγάλη δυνατότητα τροποποίησής τους. Από τον περασμένο αιώνα ο όγκος παραγωγής των πολυμερών έχει αυξηθεί σε μεγάλο βαθμό, το οποίο έχει φέρει και σαν αποτέλεσμα όμως την αύξηση των πολυμερικών αποβλήτων. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί πολυμερικά υλικά, τα οποία είναι βιοαποικοδομήσιμα με σκοπό την αντιμετώπιση αυτού του προβλήματος, όπως το πολυγαλακτικό οξύ (PLA), το οποίο χρησιμοποιήθηκε και μελετήθηκε στην εργασία αυτή.

Στην παρούσα πτυχιακή εργασία πραγματοποιήθηκε ανάπτυξη και μελέτη δοκιμίων πολυγαλακτικού οξέος, εκτυπωμένα σε τρισδιάστατο εκτυπωτή FFF, και μετά την τοποθέτηση των δειγμάτων σε θερμοπρέσσα, δοκιμάστηκαν για την αντοχή τους στην κάμψη τριών σημείων.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η διερεύνηση των μηχανικών αντοχών ικριωμάτων πολυγαλακτικού οξέος απέναντι στην κάμψη τριών σημείων, όπου τα αποτελέσματα ήταν αρκετά ενθαρρυντικά.



ABSTRACT

Polymers are a group of materials, which in recent years have taken the place of classic materials with traditional applications. Since the time of the ancient Greeks, the Egyptians and the Aztecs, polymers have been in the daily life of man, working together if they have found systematic use in the last century, due to the rapid development of science. Scientists have shown particular interest in this category of materials, as these materials present special physical and mechanical properties and show a great possibility of their modification. Since the last century, the volume of production of polymers has increased to a great extent, which has also resulted in the increase of polymer waste. In recent years, biodegradable polymeric materials have been developed to address this problem, such as polylactic acid (PLA), which was used and studied in this work.

In this thesis, polylactic acid samples were developed and studied, printed in 3D FFF processing, and after placing the samples in a heat press, they were tested for their three-point bending strength.

The purpose of this work is to investigate the mechanical strengths of polylactic acid scaffolds against three-point bending, where the results were quite encouraging.



ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η λέξη πολυμερές προέρχεται από τις λέξεις πολύ και μέρος, δηλαδή όπως φαίνεται και από την ίδια τη λέξη, τα πολυμερή αποτελούνται από πολλά μέρη (μονομερή). Τα πολυμερή υπάρχουν στη φύση, όπως οι πρωτεΐνες, το γυαλί και το καουτσούκ. Υπάρχουν όμως και τα συνθετικά πολυμερή, τα οποία προκύπτουν μετά από επεξεργασία. Τα πολυμερή βρίσκονται παντού στην καθημερινότητά μας εδώ και πολλούς αιώνες, όμως μόλις από τον προηγούμενο αιώνα αυτά τα υλικά άρχισαν να αξιοποιούνται και να μελετούνται εντονότερα. Κάποια πολυμερή βέβαια αποδείχθηκε πως τα χρησιμοποιούσαν αρχαίοι λαοί, όπως οι Μάγια, οι Ολμέκοι και οι Αζτέκοι τη φυσική κόμμι για να δημιουργήσουν το λάστιχο.

Οι επιστήμονες έχουν στραφεί τον τελευταίο αιώνα στα πολυμερή με ιδιαίτερη ένταση, καθώς αυτή η κατηγορία υλικών παρουσιάζει πολλές ωφέλιμες ιδιότητες. Κυριότερη ιδιότητα αποτελεί η χαμηλή τους πυκνότητα, η οποία συνοδεύεται και από άλλες, όπως το ότι είναι ελαφριά και οικονομικά υλικά, είναι εύκολα στη διαχείριση και τη μορφοποίηση, είναι μονωτικά και βιοσυμβατά υλικά.

Ακόμα βέβαια δεν μπορούν να ξεπεράσουν τα αντίστοιχα υλικά, που γίνεται προσπάθεια να αντικατασταθούν, όπως τα μέταλλα, υπάρχουν όμως αισιόδοξα αποτελέσματα με την είσοδο των νανοϋλικών, καθώς προσδίδουν νέες ιδιότητες στα πολυμερή, όπως παραπάνω αντοχή.

Τα πλεονεκτήματα των πολυμερών είναι πάρα πολλά, ωστόσο δεν μπορεί να ξεπεραστεί ο όγκος των απορριμμάτων, που αφήνουν πίσω τους. Αυτός είναι και ο λόγος που δημιουργούνται νέα υλικά, όπως το πολυγαλακτικό οξύ, που χρησιμοποιήθηκε σε αυτή την εργασία, το οποίο είναι βιοδιασπώμενο.

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η δημιουργία δοκιμίων πολυγαλακτικού οξέος, τα οποία έχουν εκτυπωθεί από έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή και έχουν περάσει από τη θερμοπρέσσα, ούτως ώστε στο τελικό στάδιο να δοκιμαστούν για την αντοχή τους σε κάμψη τριών σημείων.

Αρχικά δημιουργήθηκαν νήματα πολυγαλακτικού οξέος (PLA) από έναν εξωθητή νήματος με θερμομηχανική μέθοδο, τα οποία τοποθετήθηκαν σε έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή με



σκοπό την εκτύπωση πλακών. Ύστερα αυτές οι πλάκες τοποθετήθηκαν σε θερμοπρέσσα, όπου δημιουργήθηκαν πλάκες σε πάχη 1,5mm και 2mm. Στη συνέχεια αυτές οι πλάκες κόπηκαν σε διαμέτρους δοκιμίων με τελικό στόχο τη δοκιμή τους σε κάμψη τριών σημείων.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο : ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ

ΠΟΛΥΜΕΡΙΚΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Αυτό το κεφάλαιο αναφέρεται στην τεχνολογία των πολυμερικών υλικών και αναλύονται αρκετά βασικά χαρακτηριστικά αυτών των υλικών.

1.1. Ορισμός Πολυμερών

Τα πολυμερή ή μακρομόρια, όπως αλλιώς αποκαλούνται, είναι μεγάλα μόρια, τα οποία δημιουργούνται από την επανάληψη μικρών δομικών μονάδων, που συνδέονται μεταξύ τους με ομοιοπολικούς δεσμούς. Τις περισσότερες φορές η λέξη πολυμερές ή μακρομόριο χαρακτηρίζει μόρια, οι οποίες διαθέτουν πάνω από δέκα δομικές μονάδες. Τα μόρια που διαθέτουν δέκα ή λιγότερες δομικές μονάδες λέγονται ολιγομερή.

Τα πολυμερή προέρχονται από χημικές ενώσεις, οι οποίες ονομάζονται μονομερή, τα οποία διαφέρουν είτε ως προς τον τρόπο σύνδεσης των ατόμων, είτε ως προς τον αριθμό των ατόμων τους. Ο αριθμός των μονομερών ονομάζεται και βαθμός πολυμερισμού.

1.2. Ιστορική αναδρομή

Ακολουθούν σημαντικοί σταθμοί στην ιστορία των πολυμερών, αν και είναι δύσκολο να αναφερθούν όλοι, καθώς είναι πάρα πολλοί.

- 1811 Gay Lussac & Thenard: Καθόρισε τη χημική δομή του αμύλου.
- 1839 Payen: Καθόρισε τη χημική δομή της κελουλόζης.
- 1861 Graham: Παρατήρησε ότι ορισμένες κατηγορίες ουσιών διαχέονται σε διάλυμα πολύ βραδύτερα από άλλες. Την ιδιότητα αυτή την απέδωσε στο μεγάλο μέγεθος του μορίου.
- 1920 Standinger: Θεμελίωσε την Επιστήμη των Πολυμερών αποδεικνύοντας ότι οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των πολυμερών οφείλονται στην μεγάλη τιμή του μοριακού τους βάρους. Ο Standinger απέδειξε ότι τα μακρομόρια διατηρούν τον βασικό σκελετό του μορίου τους σε μια σειρά χημικών μετατροπών (Nobel στη Χημεία 1953).



- 1960 Natta & Ziegler: Ανακάλυψαν νέους καταλύτες που προωθούν τον πολυμερισμό των αολεφινών (Nobel στη Χημεία 1963).
- 1940-70 Flory: Ανέπτυξε τις θερμοδυναμικές θεωρήσεις για τα διαλύματα πολυμερών, για την κατάσταση ισορροπίας κατά τον σταδιακό πολυμερισμό και για τις στατιστικές διαμορφώσεις των πολυμερικών αλυσίδων καθώς και θεωρίες για την ιξωδοελαστικότητα των πολυμερών (Nobel στη Χημεία 1974).
- 1970-2000 DeGennes: Ανέπτυξε θεωρίες για την εφαρμογή των υγρών κρυστάλλων, τη φιδοειδή κίνηση των πολυμερικών αλυσίδων καθώς και την προσκόλληση των φάσεων. (Nobel στη Φυσική 1991).
- 1970-2000 Shirakawa-MacDiarmid-Heeger: Ανέπτυξαν τα αγώγιμα πολυμερή (Nobel στη Χημεία 2000).

1.3. Δομή του μορίου και επίδραση του μεγέθους του στο πολυμερές

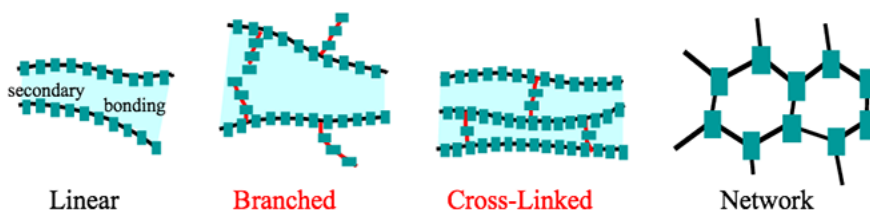
Η δομή ενός μορίου μπορεί να διαφοροποιηθεί με βάση τη σύνθεση και τη μορφή του. Με βάση τη σύνθεσή του μπορεί να είναι ομοπολυμερές ή συμπολυμερές, δηλαδή αν έχει ένα είδος δομικές μονάδες ή από δύο και περισσότερες, αντίστοιχα. Στα ομοπολυμερή μπορεί να υπάρξει μια θεωρητική πρόβλεψη για τις ιδιότητές τους, καθώς έχουν τις ιδιότητες του μονομερούς, όμως για τα συμπολυμερή δεν είναι εύκολο να γίνει κάτι τέτοιο. Σε αυτή την περίπτωση χρειάζονται γνώσεις των ιδιοτήτων του κάθε μονομερούς ξεχωριστά, που όμως δεν εγγυάται την πρόβλεψη των νέων ιδιοτήτων, καθώς μπορεί κάποιες ιδιότητες κάποιων μονομερών να καλύπτουν αυτές άλλων ή να υπάρχει έντονη αλληλεπίδραση.

Τα πολυμερή, τα οποία έχουν ίδια ή παρόμοια δομή τα μόριά τους, ονομάζονται ομοπολυμερή. Δεν έχουν όμως το ίδιο μέγεθος. Τα πολυμερή συνήθως είναι πολυδιάσπαρτα, δηλαδή να μην έχουν ομοιογενή μόρια όσο αφορά το μέγεθος. Αυτό εξαρτάται και από τον τρόπο που παράγονται. Γενικά στα πολυμερή δεν υπάρχει ένα σταθερό μοριακό βάρος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το πολυστυρένιο, το οποίο μπορεί να βρεθεί με διάφορα μοριακά μεγέθη.

Σε γενικές γραμμές θα μπορούσε κάποιος να πει πως ακόμα και δύο ίδια πολυμερή μπορεί να έχουν διαφορετικές μηχανικές ιδιότητες, όπως και ρεολογία, πάντα ως γνώμονα το μοριακό βάρος του καθενός [1].

1.4. Μορφές αλυσίδων

Υπάρχουν τέσσερις βασικές πολυμερείς δομές που φαίνονται στο παρακάτω σχήμα. Στην πράξη, ορισμένα πολυμερή μπορεί να περιέχουν ένα μείγμα από τις διάφορες βασικές δομές. Οι τέσσερις βασικές δομές πολυμερών είναι γραμμικές, διακλαδισμένες, διασταυρούμενες και δικτυωμένες [2].



Εικόνα 1: Τέσσερις βασικές δομές πολυμερών

Τα γραμμικά πολυμερή μοιάζουν με «μακαρόνια» με μακριές αλυσίδες. Οι μακριές αλυσίδες συνήθως συγκρατούνται μεταξύ τους από τον ασθενέστερο δεσμό van der Waals ή υδρογόνο. Δεδομένου ότι αυτοί οι τύποι συγκόλλησης είναι σχετικά εύκολο να σπάσουν με τη θερμότητα, τα γραμμικά πολυμερή είναι συνήθως θερμοπλαστικά. Η θερμότητα σπάει τους δεσμούς μεταξύ των μακρών αλυσίδων επιτρέποντας στις αλυσίδες να ρέουν η μία δίπλα από την άλλη, επιτρέποντας στο υλικό να αναμορφωθεί. Κατά την ψύξη των δεσμών μεταξύ των μακρών αλυσίδων αναμορφώνονται, δηλαδή, το πολυμερές σκληραίνει.

Τα διακλαδισμένα πολυμερή μοιάζουν με γραμμικά πολυμερή με την προσθήκη μικρότερων αλυσίδων που κρέμονται από τη ραχοκοκαλιά των σπαγγέτι. Δεδομένου ότι αυτές οι μικρότερες αλυσίδες μπορούν να παρεμβαίνουν στην αποτελεσματική συσκευασία των πολυμερών, τα διακλαδισμένα πολυμερή τείνουν να είναι λιγότερο πυκνά από παρόμοια γραμμικά πολυμερή. Δεδομένου ότι οι κοντές αλυσίδες δεν γεφυρώνουν από τη μια μακρύτερη ραχοκοκαλιά στην άλλη, η θερμότητα συνήθως θα σπάσει τους δεσμούς μεταξύ των διακλαδισμένων πολυμερών αλυσίδων και θα επιτρέψει στο πολυμερές να είναι ένα θερμοπλαστικό, αν και υπάρχουν μερικά πολύ πολύπλοκα διακλαδισμένα πολυμερή που αντιστέκονται σε αυτό το «τήκωμα» και έτσι διαλύονται (γίνονται σκληρά στη διαδικασία) πριν μαλακώσουν, δηλ. θερμοσκληρύνονται.



Τα διασυνδεδεμένα πολυμερή μοιάζουν με σκάλες. Οι αλυσίδες συνδέονται από τη μια ραχοκοκαλιά στην άλλη. Έτσι, σε αντίθεση με τα γραμμικά πολυμερή που συγκρατούνται μεταξύ τους με ασθενέστερες δυνάμεις van der Waals, τα διασταυρούμενα πολυμερή συνδέονται μεταξύ τους μέσω ομοιοπολικού δεσμού. Αυτός ο πολύ ισχυρότερος δεσμός καθιστά τα περισσότερα διασυνδεδεμένα πολυμερή θερμοσκληρυνόμενα, με λίγες μόνο εξαιρέσεις στον κανόνα: πολυμερή με σταυροδεσμούς που τυχάνει να σπάνε τους σταυροδεσμούς τους σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες.

Τα δικτυωμένα πολυμερή είναι πολύπλοκα πολυμερή που συνδέονται σε μεγάλο βαθμό για να σχηματίσουν ένα πολύπλοκο δίκτυο τρισδιάστατων συνδέσεων. Αυτά τα πολυμερή είναι σχεδόν αδύνατο να μαλακώσουν όταν θερμαίνονται χωρίς να υποβαθμιστεί η υποκείμενη δομή του πολυμερούς και επομένως είναι θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή.

Τα μονομερή δεν χρειάζεται να είναι τύπου ενός ατόμου, αλλά όταν αναφερόμαστε σε ένα συγκεκριμένο μονομερές εννοείται ότι είναι της ίδιας δομής σύνθεσης. Κατά την κατασκευή ενός πολυμερούς από δύο διακριτά μονομερή, αυτά τα πολυμερή αναφέρονται ως συμπολυμερή. Στη συνέχεια, θα δούμε πώς ταξινομούνται τα συμπολυμερή.

Εάν ένας χημικός συνθέτει ένα πολυμερές χρησιμοποιώντας δύο διαφορετικά μονομερή έναρξης, υπάρχουν διάφορες πιθανές δομές, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι τέσσερις βασικές δομές είναι τυχαίες, εναλλασσόμενες, μπλοκ και μοσχεύματα. Εάν τα δύο μονομερή ταξινομούνται τυχαία, τότε το συμπολυμερές, δεν αποτελεί έκπληξη, αναφέρεται ως τυχαίο συμπολυμερές. Σε ένα εναλλασσόμενο συμπολυμερές, κάθε μονομερές εναλλάσσεται με το άλλο για να σχηματίσει ένα σχέδιο -A-B-A-B-A-B-A-.... Στα συμπολυμερή κατά συστάδες, είναι δυνατές πιο πολύπλοκες επαναλαμβανόμενες δομές, για παράδειγμα -A-A-A-B-B-B-A-A-A-B-B-B-A-A-A-... Τα συμπολυμερή εμβολιασμού δημιουργούνται με την προσάρτηση αλυσίδων ενός δεύτερου τύπου μονομερούς στη βασική αλυσίδα ενός πρώτου τύπου μονομερούς.

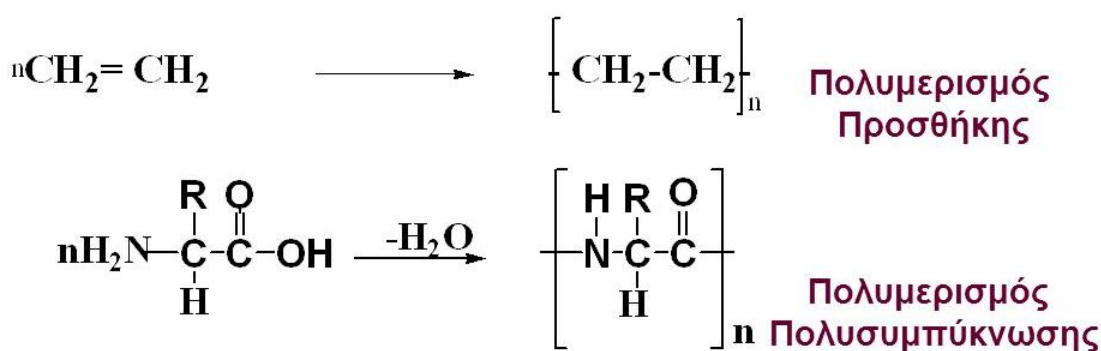
1.5. Πολυμερικές αντιδράσεις

Τα πολυμερή, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι τεράστιες αλυσίδες ή μερικές φορές ακόμη και τρισδιάστατες δομές επαναλαμβανόμενων μονάδων γνωστές ως μονομερή. Το μονομερές είναι η βασική μονάδα ενός πολυμερούς. Αυτά τα μονομερή μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους σε κάθε πλευρά, ενδεχομένως για πάντα [3].



Έτσι, αυτή η αντίδραση του συνδυασμού αυτών των μονομερών για να σχηματιστούν μακριές αλυσίδες ή τρισδιάστατα δίκτυα είναι γνωστή ως πολυμερισμός. Γενικά ο πολυμερισμός μπορεί να ταξινομηθεί σε δύο κατηγορίες:

- Πολυμερισμός σταδιακής ανάπτυξης ή συμπύκνωσης
- Πολυμερισμός Αλυσίδας-Ανάπτυξης ή Προσθήκης



Εικόνα 2: Πολυμερισμός προσθήκης και πολυσυμπύκνωσης

Πολυμερισμός προσθήκης

Όπως υποδηλώνει το όνομα τα πολυμερή προσθήκης σχηματίζονται όταν συμβαίνει μια αντίδραση προσθήκης. Τα επαναλαμβανόμενα μονομερή σχηματίζουν μια γραμμική ή διακλαδούμενη δομή ανάλογα με τον τύπο του μονομερούς. Κατά τη διάρκεια του πολυμερισμού προσθήκης, τα μονομερή αναδιατάσσονται για να σχηματίσουν μια νέα δομή. Αλλά δεν υπάρχει απώλεια ατόμου ή μορίου. Και πάλι υπάρχουν τέσσερις τύποι πολυμερισμών προσθήκης που είναι

- Πολυμερισμός ελεύθερων ριζών: Εδώ το πολυμερές προσθήκης σχηματίζεται με προσθήκη ατόμων με ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο στα κελύφη σθένους του. Αυτές είναι γνωστές ως ελεύθερες ρίζες. Ενώνονται σε μια διαδοχική αλυσίδα κατά τον πολυμερισμό ελεύθερων ριζών.
- Κατιονικός πολυμερισμός: Πολυμερισμός όπου σχηματίζεται κατιόν προκαλώντας αλυσιδωτή αντίδραση. Έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό μιας μακριάς αλυσίδας επαναλαμβανόμενων μονομερών



- Πολυμερισμός ανιονικού βινυλίου: Περιλαμβάνει τον πολυμερισμό ιδιαίτερα πολυμερών βινυλίου με ισχυρή ηλεκτραρνητική ομάδα για να σχηματιστεί μια αλυσιδωτή αντίδραση».
- Πολυμερισμός συντονισμού: Αυτή η μέθοδος επινοήθηκε από δύο επιστήμονες Ziegler και Natta που κέρδισαν το βραβείο Νόμπελ για το έργο τους. Ανέπτυξαν έναν καταλύτη που μας επιτρέπει να ελέγξουμε τον πολυμερισμό των ελεύθερων ριζών. Παράγει ένα πολυμερές που έχει μεγαλύτερη πυκνότητα και αντοχή.

Πολυμερισμός Συμπύκνωσης

Τα πολυμερή συμπύκνωσης σχηματίζονται από το στάδιο της ανάπτυξης πολυμερισμού. Εδώ, όταν τα μόρια των μονομερών αντιδρούν για να σχηματίσουν έναν δεσμό, αντικαθιστούν ορισμένα μόρια. Αυτά τα μόρια είναι το παραπροϊόν της αντίδρασης. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτό το παραπροϊόν είναι ένα μόριο νερού.

Ο τύπος των πολυμερών που προκύπτουν από έναν πολυμερισμό συμπύκνωσης εξαρτάται από τα μονομερή. Εάν το μονομερές έχει μόνο μία δραστική ομάδα, τα πολυμερή που σχηματίζονται έχουν χαμηλό μοριακό βάρος. Όταν τα μονομερή έχουν δύο αντιδραστικές ακραίες ομάδες παίρνουμε γραμμικά πολυμερή. Και μονομερή με περισσότερες από δύο αντιδραστικές ομάδες καταλήγουν σε ένα πολυμερές με τρισδιάστατο δίκτυο.

Ο πολυεστέρας και το νάιλον είναι δύο κοινά πολυμερή συμπύκνωσης. Ακόμη και οι πρωτεΐνες και οι υδατάνθρακες είναι αποτέλεσμα πολυμερισμού συμπύκνωσης.

1.6. Κατάταξη πολυμερών

Όταν οι περισσότεροι άνθρωποι σκέφτονται τα πολυμερή, τα πρώτα πράγματα που έρχονται στο μυαλό τείνουν να είναι κατασκευασμένα από τον άνθρωπο—τα αυστραλιανά τραπεζογραμμάτια, για παράδειγμα, ή τα περίεργα αδιάβροχα από PVC της δεκαετίας του εβδομήντα. Υπάρχουν όμως και πολλά πολυμερή που υπάρχουν στη φύση. Τα άμυλα που βρίσκονται στο καλαμπόκι και τις πατάτες είναι πολυσακχαρίτες (πολυμερή ζάχαρης). Το μετάξι και τα μαλλιά είναι πολυμερή γνωστά ως πολυπεπτίδια. Η κυτταρίνη, που αποτελεί το κυτταρικό τοίχωμα των φυτών, είναι ένα άλλο φυσικό πολυμερές. Οι πρωτεΐνες που τρώμε και από τις οποίες είμαστε φτιαγμένοι, είναι πολυμερή που

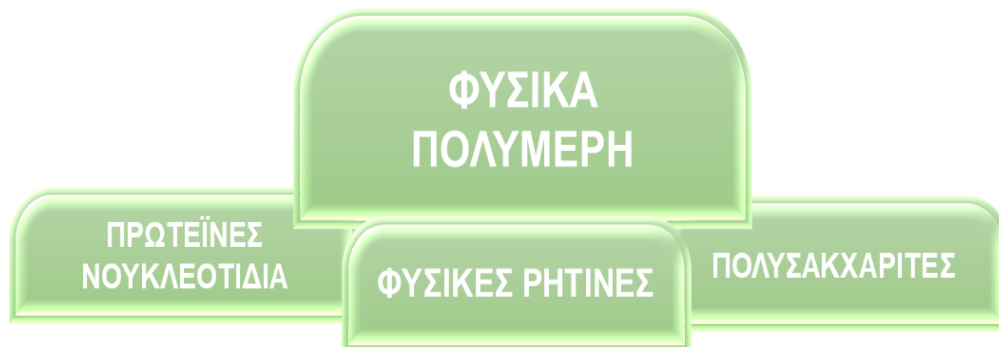


αποτελούνται από αμινοξέα. Και ακόμη και το DNA μας είναι ένα πολυμερές - είναι φτιαγμένο από μονομερή που ονομάζονται νουκλεοτίδια [3], [4].

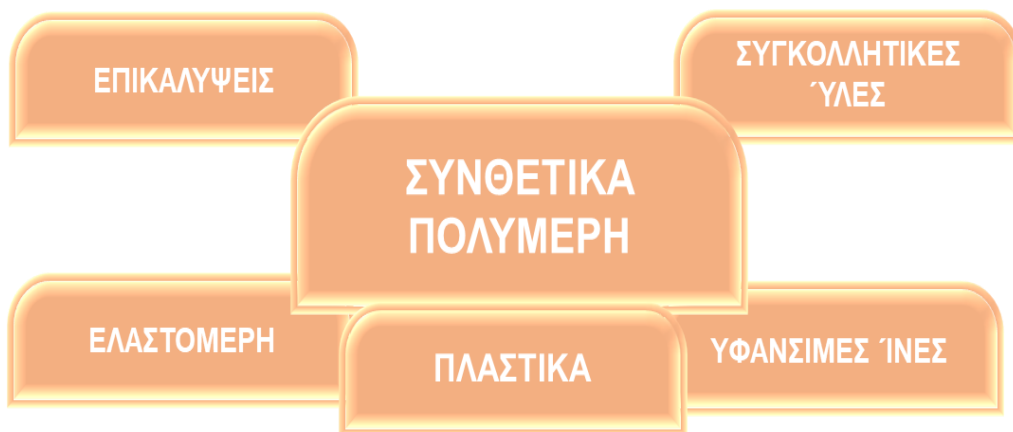
Τα πρώτα τεχνητά πολυμερή ήταν στην πραγματικότητα τροποποιημένες εκδόσεις αυτών των φυσικών πολυμερών. Το Celluloid, το υλικό από το οποίο φτιάχτηκε η ταινία του βωβού κινηματογράφου, ήταν ένα πλαστικό που δημιουργήθηκε από χημικά τροποποιημένη κυτταρίνη. Το πρώτο εντελώς συνθετικό πολυμερές (δηλαδή, που κατασκευάστηκε από ανθρώπους μέσω χημικής σύνθεσης), που εφευρέθηκε στα πρώτα χρόνια του εικοστού αιώνα, ήταν ο Βακελίτης: ένα πλαστικό που κατασκευάστηκε από την αντίδραση φαινόλης και φορμαλδεΐδης υπό πίεση σε υψηλές θερμοκρασίες. Ανακαλύφθηκε όταν ο εφευρέτης του, Leo Baekeland, προσπαθούσε να βρει ένα αντικαταστάτη για το shellac, ένα φυσικό πολυμερές φτιαγμένο από τα κελύφη των ασιατικών σκαθαριών.

Σήμερα, υπάρχουν όλα τα είδη συνθετικών πολυμερών, από πολυαιθυλένιο (το πιο κοινό πλαστικό στον κόσμο) έως πολυεστέρα. Χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία των πάντων, από σωλήνες αποχέτευσης και μπουκάλια ποτών μέχρι συρρικνωμένο περιτύλιγμα και σπάτουλες. Διαφορετικοί συνδυασμοί μονομερών σε αυτές τις μακριές πολυμερείς αλυσίδες έχουν ως αποτέλεσμα πολυμερή με διαφορετικές ιδιότητες (περισσότερα για το πώς και γιατί λίγο αργότερα), έτσι ώστε τα πολυμερή να μπορούν να δημιουργηθούν ανάλογα με το είδος των χαρακτηριστικών που χρειάζεστε να έχει το υλικό σας - αντοχή, ανθεκτικότητα, ευελιξία, και ούτω καθεξής.

Παρακάτω στα σχήματα φαίνονται οι κύριες κατηγορίες των πολυμερών.



Εικόνα 3: Φυσικά Πολυμερή



Εικόνα 4: Συνθετικά Πολυμερή

Δεδομένου ότι τα πολυμερή είναι πολυάριθμα με διαφορετικές συμπεριφορές και μπορούν να βρεθούν φυσικά ή να δημιουργηθούν συνθετικά, μπορούν να ταξινομηθούν με διάφορους τρόπους. Τα παρακάτω είναι μερικοί βασικοί τρόποι, οι οποίοι αναφέρονται επιγραμματικά, με τους οποίους ταξινομούμε τα πολυμερή:

1] Ταξινόμηση με βάση την πηγή

Η πρώτη ταξινόμηση των πολυμερών βασίζεται στην πηγή προέλευσής τους, Ας ρίξουμε μια ματιά.

(i) Φυσικά πολυμερή



Ο ευκολότερος τρόπος ταξινόμησης των πολυμερών είναι η πηγή προέλευσής τους. Τα φυσικά πολυμερή είναι πολυμερή που υπάρχουν στη φύση και υπάρχουν σε φυσικές πηγές όπως τα φυτά και τα ζώα. Μερικά κοινά παραδείγματα είναι οι πρωτεΐνες (που βρίσκονται τόσο σε ανθρώπους όσο και σε ζώα), η κυτταρίνη και το άμυλο (που βρίσκονται στα φυτά) ή το καουτσούκ (το οποίο συλλέγουμε από το λατέξ ενός τροπικού φυτού).

(ii) Συνθετικά πολυμερή

Τα συνθετικά πολυμερή είναι πολυμερή που οι άνθρωποι μπορούν να δημιουργήσουν/συνθέσουν τεχνητά σε ένα εργαστήριο. Αυτά παράγονται εμπορικά από βιομηχανίες για ανθρώπινες ανάγκες. Μερικά κοινά παραγόμενα πολυμερή που χρησιμοποιούμε καθημερινά είναι το Πολυαιθυλένιο (ένα πλαστικό μαζικής παραγωγής που χρησιμοποιούμε στις συσκευασίες) ή οι ίνες νάιλον (που χρησιμοποιούνται συνήθως στα ρούχα μας, στα δίχτυα ψαρέματος κ.λπ.)

(iii) Ημισυνθετικά πολυμερή

Τα ημισυνθετικά πολυμερή είναι πολυμερή που λαμβάνονται με τροποποίηση φυσικών πολυμερών τεχνητά σε εργαστήριο. Τα πολυμερή αυτά σχηματίζονται με χημική αντίδραση (σε ελεγχόμενο περιβάλλον) και είναι εμπορικής σημασίας. Παράδειγμα: Βουλκανισμένο καουτσούκ (Το θείο χρησιμοποιείται στη διασταυρούμενη συγκόλληση των πολυμερών αλυσίδων που βρίσκονται στο φυσικό καουτσούκ) Οξεική κυτταρίνη (ρεγιόν) κ.λπ.

2] Ταξινόμηση με βάση τη δομή των πολυμερών

Η ταξινόμηση των πολυμερών με βάση τη δομή τους μπορεί να είναι τριών τύπων:

(i) Γραμμικά πολυμερή:

Αυτά τα πολυμερή είναι παρόμοια στη δομή με μια μακριά ευθεία αλυσίδα με πανομοιότυπους κρίκους συνδεδεμένους μεταξύ τους. Τα μονομερή σε αυτά συνδέονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν μια μακριά αλυσίδα. Αυτά τα πολυμερή έχουν υψηλά σημεία τήξης και είναι μεγαλύτερης πυκνότητας. Ένα κοινό παράδειγμα αυτού είναι το



PVC (πολυ-βινυλοχλωρίδιο). Αυτό το πολυμερές χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό για την κατασκευή ηλεκτρικών καλωδίων και σωλήνων.

(ii) Πολυμερή διακλαδούμενης αλυσίδας:

Όπως περιγράφει ο τίτλος, η δομή αυτών των πολυμερών μοιάζει με κλάδους που προέρχονται σε τυχαία σημεία από μια ενιαία γραμμική αλυσίδα. Τα μονομερή ενώνονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν μια μακριά ευθεία αλυσίδα με μερικές διακλαδισμένες αλυσίδες διαφορετικού μήκους. Ως αποτέλεσμα αυτών των διακλαδώσεων, τα πολυμερή δεν συσκευάζονται στενά μεταξύ τους. Είναι χαμηλής πυκνότητας με χαμηλά σημεία τήξης. Το πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE) που χρησιμοποιείται σε πλαστικές σακούλες και δοχεία γενικής χρήσης είναι ένα συνηθισμένο παράδειγμα

(iii) Πολυμερή σταυροειδών δεσμών ή δικτύου:

Σε αυτόν τον τύπο πολυμερών, τα μονομερή συνδέονται μεταξύ τους για να σχηματίσουν ένα τρισδιάστατο δίκτυο. Τα μονομερή περιέχουν ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς καθώς αποτελούνται από διλειτουργική και τριλειτουργική φύση. Αυτά τα πολυμερή είναι εύθραυστα και σκληρά. Π.χ.: - Βακελίτης (χρησιμοποιείται σε ηλεκτρικούς μονωτές), μελαμίνη κ.λπ.

3] Με βάση τον τρόπο πολυμερισμού

Ο πολυμερισμός είναι η διαδικασία με την οποία τα μόρια μονομερούς αντιδρούν μαζί σε μια χημική αντίδραση για να σχηματίσουν μια αλυσίδα πολυμερούς (ή τρισδιάστατα δίκτυα). Ανάλογα με τον τύπο του πολυμερισμού, τα πολυμερή μπορούν να ταξινομηθούν ως:

i) Πολυμερή προσθήκης:

Αυτοί οι τύποι πολυμερών σχηματίζονται με την επαναλαμβανόμενη προσθήκη μορίων μονομερούς. Το πολυμερές σχηματίζεται με πολυμερισμό μονομερών με διπλούς ή τριπλούς δεσμούς (ακόρεστες ενώσεις). Σημειώστε, σε αυτή τη διαδικασία, δεν υπάρχει εξαλειψη μικρών μορίων όπως νερό ή αλκοόλ κ.λπ. (κανένα υποπροϊόν της διαδικασίας). Τα πολυμερή προσθήκης έχουν πάντα τους εμπειρικούς τύπους τους ίδιους με τα μονομερή τους. Παράδειγμα: αιθένιο $\eta(\text{CH}_2=\text{CH}_2)$ έως πολυαιθένιο $-(\text{CH}_2-\text{CH}_2)_n-$.



ii) Πολυμερή συμπίκνωσης:

Αυτά τα πολυμερή σχηματίζονται από το συνδυασμό μονομερών, με την εξάλειψη μικρών μορίων όπως το νερό, η αλκοόλη κ.λπ. Τα μονομερή σε αυτούς τους τύπους αντιδράσεων συμπίκνωσης είναι δι-λειτουργικής ή τρι-λειτουργικής φύσης. Ένα κοινό παράδειγμα είναι ο πολυμερισμός εξαμεθυλενοδιαμίνης και αδιπτικού οξέος. να δώσει Nylon – 66, όπου τα μόρια του νερού αποβάλλονται κατά τη διαδικασία.

4] Ταξινόμηση με βάση τις μοριακές δυνάμεις

Οι ενδομοριακές δυνάμεις είναι οι δυνάμεις που συγκρατούν τα άτομα ενωμένα μέσα σε ένα μόριο. Στα πολυμερή, ισχυροί ομοιοπολικοί δεσμοί ενώνουν άτομα μεταξύ τους σε μεμονωμένα μόρια πολυμερούς. Οι διαμοριακές δυνάμεις (μεταξύ των μορίων) έλκουν τα μόρια πολυμερούς το ένα προς το άλλο.

Σημειώστε ότι οι ιδιότητες που παρουσιάζουν τα στερεά υλικά όπως τα πολυμερή εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ισχύ των δυνάμεων μεταξύ αυτών των μορίων. Χρησιμοποιώντας αυτό, τα πολυμερή μπορούν να ταξινομηθούν σε 4 τύπους:

i) Ελαστομερή:

Τα ελαστομερή είναι στερεά πολυμερή που μοιάζουν με καουτσούκ, τα οποία είναι ελαστικής φύσης. Όταν λέμε ελαστικό, ουσιαστικά εννοούμε ότι το πολυμερές μπορεί εύκολα να τεντωθεί ασκώντας λίγη δύναμη.

Το πιο συνηθισμένο παράδειγμα αυτού μπορεί να παρατηρηθεί σε λαστιχάκια (ή κορδέλες μαλλιών). Η εφαρμογή λίγης πίεσης επιμηκύνει τη ζώνη. Οι αλυσίδες πολυμερούς συγκρατούνται από τις πιο αδύναμες διαμοριακές δυνάμεις, επιτρέποντας έτσι στο πολυμερές να τεντωθεί. Αλλά όπως παρατηρείτε, η αφαίρεση αυτού του στρες έχει επίσης ως αποτέλεσμα το λάστιχο να πάρει την αρχική του μορφή. Αυτό συμβαίνει καθώς εισάγουμε σταυροδεσμούς μεταξύ των αλυσίδων πολυμερούς που το βοηθούν να ανασυρθεί στην αρχική του θέση και να πάρει την αρχική του μορφή. Τα ελαστικά του αυτοκινήτου μας είναι κατασκευασμένα από βουλκανισμένο καουτσούκ. Αυτό είναι όταν εισάγουμε θείο για τη διασταυρούμενη σύνδεση των πολυμερών αλυσίδων.

ii) Θερμοπλαστικά:



Τα θερμοπλαστικά πολυμερή είναι πολυμερή μακράς αλυσίδας στα οποία οι δυνάμεις μεταξύ μορίων (δυνάμεις του Van der Waal) συγκρατούν τις πολυμερείς αλυσίδες μαζί. Αυτά τα πολυμερή όταν θερμαίνονται μαλακώνουν (σαν παχύ ρευστό) και σκληραίνουν όταν αφήνονται να κρυώσουν, σχηματίζοντας μια σκληρή μάζα. Δεν περιέχουν διασταυρούμενο δεσμό και μπορούν εύκολα να διαμορφωθούν με θέρμανση και χρήση καλουπιών. Ένα κοινό παράδειγμα είναι το πολυστυρένιο ή το PVC (το οποίο χρησιμοποιείται στην κατασκευή σωλήνων).

iii) Θερμοσκληρυνόμενη:

Τα θερμοσκληρυνόμενα πλαστικά είναι πολυμερή τα οποία είναι ημιρευστού χαρακτήρα με μικρές μοριακές μάζες. Όταν θερμαίνονται, αρχίζουν να διασταυρώνονται μεταξύ των πολυμερών αλυσίδων, και ως εκ τούτου γίνονται σκληρά και μη εγχύσιμα. Σχηματίζουν μια τρισδιάστατη δομή στην εφαρμογή της θερμότητας. Αυτή η αντίδραση είναι μη αναστρέψιμη στη φύση. Το πιο συνηθισμένο παράδειγμα θερμοσκληρυνόμενου πολυμερούς είναι αυτό του βακελίτη, ο οποίος χρησιμοποιείται στην κατασκευή ηλεκτρικής μόνωσης.

iv) Ίνες:

Στην ταξινόμηση των πολυμερών, αυτά είναι μια κατηγορία πολυμερών που είναι ένα νήμα όπως στη φύση και μπορούν εύκολα να υφανθούν. Έχουν ισχυρές διαμοριακές δυνάμεις μεταξύ των αλυσίδων δίνοντάς τους λιγότερη ελαστικότητα και υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό. Οι διαμοριακές δυνάμεις μπορεί να είναι δεσμοί υδρογόνου ή αλληλεπίδραση διπόλου-διπόλου. Οι ίνες έχουν αιχμηρά και υψηλά σημεία τήξης. Ένα συνηθισμένο παράδειγμα είναι αυτό του Nylon-66, το οποίο χρησιμοποιείται σε χαλιά και ενδύματα.

Τα παραπάνω ήταν οι γενικοί τρόποι ταξινόμησης των πολυμερών. Μια άλλη κατηγορία πολυμερών είναι αυτή των Βιοπολυμερών. Τα βιοπολυμερή είναι πολυμερή που λαμβάνονται από ζωντανούς οργανισμούς. Είναι βιοδιασπώμενα και έχουν πολύ καλά καθορισμένη δομή. Διάφορα βιομόρια όπως οι υδατάνθρακες και οι πρωτεΐνες αποτελούν μέρος της κατηγορίας.



1.7. Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες πολυμερών

Η παρακάτω λίστα περιγράφει μερικές από τις σημαντικές ιδιότητες ενός πολυμερούς [5], [6].

Φυσικές ιδιότητες

- **Θερμοχωρητικότητα/ Θερμοαγωγιμότητα** -- Ο βαθμός στον οποίο το πλαστικό ή το πολυμερές δρα ως αποτελεσματικός μονωτής έναντι της ροής της θερμότητας. (Το πολυστυρένιο στα πλαστικά ποτήρια μιας χρήσης δεν είναι πολύ καλός μονωτήρας. Ωστόσο, η διοχέτευση αέρα μέσω του στυρενίου ενώ πολυμερίζεται δίνει το φελιζόλ που χρησιμοποιείται για φλιτζάνια καφέ μιας χρήσης, το οποίο είναι πολύ καλύτερος μονωτήρας.)
- **Θερμική διαστολή** -- Ο βαθμός στον οποίο το πολυμερές διαστέλλεται ή συστέλλεται όταν θερμαίνεται ή ψύχεται. (Η σιλικόνη χρησιμοποιείται συχνά για τη σφράγιση των γυάλινων παραθύρων στα πλαίσια τους επειδή έχει πολύ χαμηλό συντελεστή θερμικής διαστολής.) Η θερμική διαστολή αφορά επίσης το ερώτημα εάν το πολυμερές διαστέλλεται ή συστέλλεται κατά την ίδια ποσότητα προς όλες τις κατευθύνσεις. (Τα πολυμερή είναι συνήθως ανισότροπα. Περιέχουν ισχυρούς ομοιοπολικούς δεσμούς κατά μήκος της αλυσίδας του πολυμερούς και πολύ ασθενέστερες δυνάμεις διασποράς μεταξύ των πολυμερών αλυσίδων. Ως αποτέλεσμα, τα πολυμερή μπορούν να διαστέλλονται με διαφορετικές ποσότητες σε διαφορετικές κατευθύνσεις.)
- **Κρυσταλλικότητα** -- Ο βαθμός στον οποίο οι αλυσίδες πολυμερούς είναι διατεταγμένες σε κανονική δομή αντί για τυχαίο τρόπο. (Ορισμένα πολυμερή, όπως το Silly Putty και το Play Dough, είναι πολύ άμορφα και στερούνται την ακαμψία που απαιτείται για να παραχθεί ένα χρήσιμο προϊόν. Τα πολυμερή που είναι πολύ κρυσταλλικά συχνά είναι επίσης πολύ εύθραυστα.)
- **Διαπερατότητα** -- Η τάση ενός πολυμερούς να διέρχεται ξένα υλικά. (Το πολυαιθυλένιο χρησιμοποιείται για το τύλιγμα των τροφίμων επειδή είναι 4000 φορές λιγότερο διαπερατό στο οξυγόνο από το πολυστυρένιο.)
- **Συντελεστής ελαστικότητας** -- Η δύναμη που απαιτείται για να τεντώσει το πλαστικό προς μία κατεύθυνση.



- Αντοχή σε εφελκυσμό -- Η αντοχή του πλαστικού. (Η δύναμη που πρέπει να εφαρμοστεί προς μία κατεύθυνση για να τεντώσει το πλαστικό μέχρι να σπάσει.)
- Ανθεκτικότητα -- Η ικανότητα του πλαστικού να αντιστέκεται στην τριβή και τη φθορά.
- Δείκτης διάθλασης-- Ο βαθμός στον οποίο το πλαστικό επηρεάζει το φως καθώς περνά μέσα από το πολυμερές. (Περνάει το φως όπως το PMMA ή απορροφά φως όπως το PVC;)
- Αντίσταση στο ηλεκτρικό ρεύμα-- Είναι το υλικό μονωτικό, όπως τα περισσότερα πολυμερή, ή φέρνει ηλεκτρικό ρεύμα; (Υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για τα αγώγιμα πολυμερή, τα οποία μπορούν να φορτιστούν και να εκφορτιστούν, και τα φωτοαγώγιμα πολυμερή που μπορούν να πάρουν ηλεκτρικό φορτίο όταν εκτεθούν στο φως.)

Μηχανικές ιδιότητες

Οι μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών προσδιορίζονται από παραμέτρους που χρησιμοποιούνται και στα μέταλλα:

- μέτρο ελαστικότητας
- αντοχή διαρροής
- εφελκυστική αντοχή
- αντοχή στην κρούση
- σκληρότητα
- κόπωση
- ερπυσμός

Για τον χαρακτηρισμό πολλών πολυμερών χρησιμοποιείται η δοκιμή τάσης – παραμόρφωσης και τα μηχανικά χαρακτηριστικά των πολυμερών είναι πολύ ευαίσθητα όσον αφορά τον ρυθμό παραμόρφωσης, τη θερμοκρασία, τη χημική φύση του περιβάλλοντος (παρουσία νερού, οξυγόνου, οργανικών διαλυτών, κλπ.).

1.8. Βιοαποικοδομήσιμα πολυμερή

Τα πολυμερή υπάρχουν παντού - και εκεί βρίσκεται το πρόβλημα [7]. Τα περισσότερα από τα πολυμερή που χρησιμοποιούνται σε καθημερινή βάση προέρχονται από προϊόντα με βάση το πετρέλαιο (οι πλαστικές σακούλες παντοπωλείου έως τους κάδους στα σπίτια)



και παρόλο που είναι ανθεκτικά στη χρήση, είναι επίσης ανθεκτικά στα απόβλητα. Και η λύση σε αυτό είναι τα βιοδιασπώμενα πολυμερή. Αυτά είναι εκείνα τα πολυμερή που μπορούν να αποσυντεθούν υπό αερόβιες ή αναερόβιες συνθήκες, ως αποτέλεσμα της δράσης μικροοργανισμών/ενζύμων. Τα υλικά το αναπτύσσουν όπως το άμυλο, η κυτταρίνη και οι πολυεστέρες. Οι αλειφατικοί πολυεστέρες είναι τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα πολυμερή αυτού του τύπου. Μερικά παραδείγματα δίνονται ως εξής:

- Πολυβ-υδροξυβουτυρικό – συν-β-υδροξυ βαλερικό (PHBV):- Προέρχεται από το συνδυασμό 3-υδροξυβουτανοϊκού οξέος και 3-υδροξυπεντανοϊκού οξέος, στο οποίο τα μονομερή διασταυρώνονται με έναν εστερικό δεσμό. Αποσυντίθεται για να σχηματίσει διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Είναι εύθραυστο στη φύση και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή φαρμάκων και την κατασκευή φιαλών.
- Nylon 2–nylon 6:- Είναι ένας πολυαμιδικός συμπολυμερισμός γλυκίνης (H_2N-CH_2-COOH) και αμινοκαπροϊκού οξέος ($H_2N-(CH_2)_5-COOH$).
- Πολυυδροξυβουτυρικό (PHB):- Σχηματίζεται από τη συμπύκνωση μορίων υδροξυβουτυρικού οξέος (3-υδροξυβουτανοϊκό οξύ).

Μη βιοδιασπώμενο πολυμερές

Αυτά τα πολυμερή είναι ανθεκτικά στην περιβαλλοντική υποβάθμιση και έτσι καταλήγουν να συσσωρεύονται με τη μορφή αποβλήτων. Πρόκειται για πολυμερή που έχουν μακριές αλυσίδες που αποτελούνται από άτομα άνθρακα και υδρογόνου. Ο διατομικός δεσμός αυτών των πολυμερών είναι πολύ ισχυρός και ανένδοτος, καθιστώντας τα ανθεκτικά στα μικρόβια που προσπαθούν να σπάσουν τους δεσμούς τους και να τα αφομοιώσουν. Όλα τα είδη πλαστικών και συνθετικών ινών είναι μη βιοδιασπώμενα στη φύση τους. Μερικά κοινά παραδείγματα μη βιοαποδομήσιμων πολυμερών είναι:

- πολυαιθυλένιο (PE), το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως στη συσκευασία
- πολυστυρένιο (PS), το οποίο είναι ένα άκαμπτο, οικονομικό πλαστικό, που χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή πλαστικών μαχαιροπήρουνων μιας χρήσης και σερβίσιων
- πολυανθρακικό (PC) του οποίου η διαφάνεια, η εξαιρετική σκληρότητα, η θερμική σταθερότητα το καθιστούν κατάλληλο για δίσκους Compact, ασπίδες κατά των



ταραχών, υαλοπίνακες προστασίας από βανδαλισμούς, μπιμπερό, ηλεκτρικά εξαρτήματα, κράνη ασφαλείας.

Χρήσεις Βιοδιασπώμενων Πολυμερών

Υπολογίζεται ότι το 86% όλων των πλαστικών συσκευασιών χρησιμοποιείται μόνο μία φορά πριν απορριφθεί, παράγοντας ένα ρεύμα απορριμμάτων που παραμένει σε υδάτινες οδούς και χωματερές, απελευθερώνει ρύπους και βλάπτει την άγρια ζωή.

Τα συμβατικά πολυμερή όπως το πολυαιθυλένιο και το πολυπροπυλένιο είναι ανθεκτικά στη φύση τους, μπορούν να διατηρηθούν για πολλά χρόνια μετά την απόρριψή τους. Είναι κατάλληλα όταν χρησιμοποιούνται για προϊόντα που απαιτούν μεγάλη διάρκεια ζωής (Παράδειγμα πλαστικά τραπέζια και καρέκλες), αλλά φαίνονται ακατάλληλα για εφαρμογές στις οποίες τα πλαστικά χρησιμοποιούνται για σύντομες χρονικές περιόδους και στη συνέχεια απορρίπτονται (Παράδειγμα: είδη συσκευασίας).

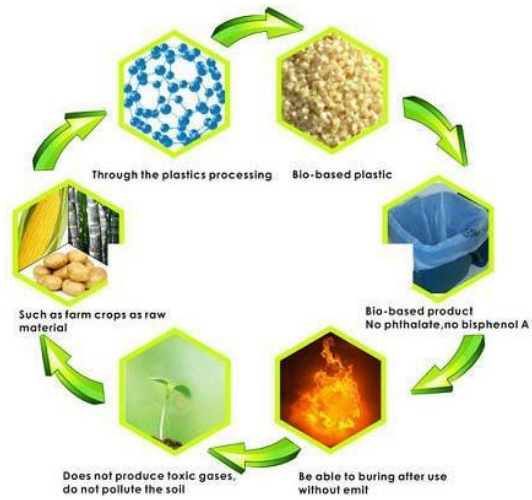
Επιπλέον, τα πλαστικά συχνά λερώνονται από τρόφιμα και άλλες βιολογικές ουσίες, καθιστώντας τη φυσική ανακύκλωση αυτών των υλικών μη πρακτική και γενικά ανεπιθύμητη. Αντίθετα, τα βιοαποδομήσιμα πολυμερή (BPs) μπορούν να απορριφθούν σε προετοιμασμένα βιοενεργά περιβάλλοντα για να υποστούν αποικοδόμηση από τις ενζυμικές δράσεις μικροοργανισμών (βακτήρια, φύκια και μύκητες).

Οι πολυμερείς αλυσίδες τους μπορεί επίσης να διασπαστούν με μη ενζυματικές διαδικασίες όπως η χημική υδρόλυση. Τα BPs προέρχονται συχνά από την επεξεργασία των φυτών του ατμοσφαιρικού CO₂. Η βιοαποδόμηση τα μετατρέπει σε CO₂, CH₄, νερό, βιομάζα, χουμική ύλη και άλλες φυσικές ουσίες. Οι BPs ανακυκλώνονται με φυσικό τρόπο με βιολογικές διεργασίες

Τα βιοαποδομήσιμα πολυμερή περιέχουν πολυμερείς αλυσίδες που διασπώνται υδρολυτικά ή ενζυματικά, με αποτέλεσμα διαλυτά προϊόντα αποδόμησης. Η βιοαποδομησιμότητα είναι ιδιαίτερα επιθυμητή σε βιοϊατρικές εφαρμογές, στις οποίες η αποικοδόμηση του πολυμερούς διασφαλίζει την απομάκρυνση από το σώμα και εξαλείφει την ανάγκη για ανάκτηση ή εκφύτευση. Τα βιοαποδομήσιμα πολυμερή έχουν εφαρμογές σε:

- Προσεγγίσεις χορήγησης φαρμάκων ελεγχόμενης/παρατεταμένης αποδέσμευσης

- Ικρίσματα μηχανικής ιστών
- Προσωρινό προσθετικό εμφύτευμα



Εικόνα 5: Κύκλος βιοδιασπώμενων πολυμερών



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο : ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΚΑΙ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΠΟΛΥΓΑΛΑΚΤΙΚΟΥ ΟΞΕΟΣ (PLA)

Το πολυγαλακτικό οξύ ή αλλιώς PLA, είναι ένα υλικό σχετικά νέο, το οποίο έχει βρει πολλές εφαρμογές και έχει να προσφέρει πολλά στο μέλλον, λόγω του ότι ανήκει στα βιοδιασπώμενα πολυμερή και με τη χρήση του μπορεί να μειωθεί ένα μέρος της ρύπανσης του πλανήτη, το οποίο είναι και ένα φλέγον ζήτημα. Σε αυτό το κεφάλαιο αναλύεται το υλικό αυτό σε μεγαλύτερο βαθμό [8].

2.1. Χαρακτηριστικά πολυγαλακτικού οξέος

Το πολυ(γαλακτικό οξύ) (PLA) ανήκει στην οικογένεια των πολυεστέρων και πιο ειδικά στους αλειφατικούς πολυεστέρες, πρόκειται για ένα θερμοπλαστικό βιοαποικοδομήσιμο πολυμερές. Με τον όρο βιοαποικοδομήσιμο περιγράφουμε ένα πολυμερές το οποίο όταν απορρίπτεται, υφίσταται σημαντική αλλαγή της χημικής δομής του υπό συγκεκριμένες περιβαλλοντικές συνθήκες, με αποτέλεσμα την απώλεια των ιδιοτήτων του. Παράλληλα, το PLA προέρχεται από ανανεώσιμες πρώτες ύλες, όπως το καλαμπόκι, το ζαχαρότευτλο και η ταπίοκα. Το πολυ(γαλακτικό οξύ) παράγεται από το γαλακτικό οξύ ή αλλιώς 2-υδροξυπροπανικό οξύ ($\text{CH}_3\text{-CH}(\text{OH})\text{COOH}$), όπως είναι και η κανονική του ονομασία ή από το λακτίδιο το οποίο αποτελεί ένα κυκλικό διμερές του γαλακτικού οξέος. Είναι το πιο διαδεδομένο υδροξυοξύ στη φύση αφού βρίσκει εφαρμογή σε πάρα πολλούς τομείς τις βιομηχανίας. Το γαλακτικό οξύ είναι ένα χειρόμορφο μόριο αφού το συναντάμε σε δύο οπτικά ισομερείς αντίποδες L-(+) ή (S) και D- (-) ή (R) (εικόνα 1.2) με την αναλογία στα δύο εναντιομερή να εξαρτάται από τον τρόπο παραγωγής του γαλακτικού οξέος, που θα περιγραφεί παρακάτω.

Το καθαρό (άνυδρο) γαλακτικό οξύ είναι στερεό, λευκό, άοσμο κρυσταλλικό σώμα που διαλύεται πολύ εύκολα στο ύδωρ με το οποίο σχηματίζει ένα διαυγές έως υποκίτρινο διάλυμα.



2.2. Ιστορία και ιδιότητες PLA

Το PLA δημιουργήθηκε τη δεκαετία του 1930 από τον Αμερικανό χημικό Wallace Carothers, ο πιο αναγνωρισμένος για την ανάπτυξη νάιλον και νεοπρενίου στη χημική εταιρεία DuPont. Αλλά μόλις τη δεκαετία του 1980 παρήχθη τελικά το PLA για χρήση από την αμερικανική εταιρεία Cargill.

Το 2010, το PLA έγινε το δεύτερο βιοπλαστικό με τη μεγαλύτερη κατανάλωση στον κόσμο λόγω της ευρείας εφαρμογής του.

Το PLA έχει πολύ καλές προοπτικές αγοράς και εξαιρετική εμπορική αξία, με μια σειρά εφαρμογών από βιομηχανική έως πολιτική χρήση. Το ενδιαφέρον για τη μαζική παραγωγή του πηγάζει από την καλή του απόδοση. για παράδειγμα, το PLA έχει καλές φυσικές ιδιότητες και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή διαφόρων πλαστικών προϊόντων, όπως κουτιά μεσημεριανού γεύματος γρήγορου φαγητού και υφάσματα για βιομηχανική και πολιτική χρήση. Η καλή αντοχή σε εφελκυσμό και η ολκιμότητα το καθιστούν κατάλληλο για διαφορετικά μέσα επεξεργασίας, όπως χύτευση με εξώθηση τήγματος, χύτευση με έγχυση, χύτευση με φουσητό φιλμ, χύτευση με αφρό και χύτευση υπό κενό. Η καλή βιοσυμβατότητά του το έχει οδηγήσει στην ευρεία χρήση του στον τομέα της βιοχημικής ιατρικής. Το PLA υψηλού μοριακού βάρους έχει χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή μη αποσυναρμολογούμενων χειρουργικών ραμμάτων και PLA χαμηλού μοριακού βάρους ως παράγοντας συσκευασίας φαρμάκων βραδείας αποδέσμευσης.

Το πολυμερές PLA έχει καλά χαρακτηριστικά όσον αφορά τη γυαλάδα, τη διαφάνεια, την αίσθηση του χεριού και την αντοχή στη θερμότητα. Η διάλυση του PLA εξαρτάται από τον βαθμό κρυσταλλικότητας του. Τα άμορφα πολυμερή είναι διαλυτά σε διάφορους οργανικούς διαλύτες, συμπεριλαμβανομένης της ακετόνης, του ακετονιτριλίου και του χλωριούχου μεθυλενίου. Επιπλέον, το κρυσταλλικό PLA μπορεί να διαλυθεί μόνο σε διχλωρομεθάνιο ή βενζόλιο σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι μηχανικές ιδιότητες και η συμπεριφορά κρυστάλλωσης σχετίζονται στενά με το μοριακό βάρος και τη στερεοχημική σύνθεση της κύριας αλυσίδας. Η υδροξυ ένωση καθορίζει το μοριακό βάρος. Ο βαθμός κρυσταλλικότητας επηρεάζει την αποικοδόμηση του PLA. Τα πολυμερή υψηλής κρυσταλλικότητας διαρκούν αρκετούς μήνες, με τον μεταβολισμό να πραγματοποιείται μόνο μετά από λίγα χρόνια, ενώ τα πολυμερή με χαμηλή κρυσταλλικότητα μπορούν να



αποσυντεθούν σε λίγες εβδομάδες. Η μετάβαση γυαλιού (T_g) επηρεάζει άμεσα την απόδοση του υλικού τόσο στη χρήση όσο και στην επεξεργασία. Τα καλά νέα είναι ότι η κρυσταλλική κατάσταση δεν επηρεάζει το T_g . Η έρευνα του Jamshidi διαπίστωσε ότι το T_g του PLA με μοριακό βάρος $22.000 \text{ g mol}^{-1}$ ήταν $55 \text{ }^\circ\text{C}$, που απέχει μόνο $5 \text{ }^\circ\text{C}$ από πολυμερή άπειρου μοριακού βάρους. Η αντοχή στην κρούση αυξάνεται με την αύξηση της κρυσταλλικότητας και του μοριακού βάρους. Τα καθαρά PDLA και PLLA έχουν σημείο τήξης (T_m) $207 \text{ }^\circ\text{C}$. Όταν αναμειχθούν σε ίσες αναλογίες, σχηματίζονται ρακεμικοί κρύσταλλοι με καλύτερες μηχανικές ιδιότητες. Το T_m αυτού του κρυστάλλου είναι $230 \text{ }^\circ\text{C}$ και η τελική αντοχή εφελκυσμού είναι 50 MPa . Τα T_g και T_m είναι ζωτικής σημασίας φυσικές παράμετροι σε σχέση με τις ιδιότητες του πολυγαλακτικού οξέος. Η θερμότητα της σύντηξης (ΔH_m) των 100% καθαρών κρυστάλλων είναι $93,7 \text{ J g}^{-1}$. Μεταγενέστερα ερευνητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι, με χαμηλή περιεκτικότητα σε PLA, τα T_m και T_g του PLA μειώνονται.

Το PLA έχει επαρκή θερμική σταθερότητα για να καθυστερήσει την αποικοδόμηση και να διατηρήσει το μοριακό βάρος και την απόδοση. Σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από $200 \text{ }^\circ\text{C}$, το PLA υφίσταται υδρόλυση, ανασυνδυασμό λακτιδίου, οξειδωτική σχάση της κύριας αλυσίδας και διαμοριακή ή ενδομοριακή μετεστεροποίηση.

Η αποικοδόμηση του PLA εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως ο χρόνος, η θερμοκρασία, οι ακαθαρσίες χαμηλού μοριακού βάρους και η συγκέντρωση του καταλύτη. Μελέτες διαπίστωσαν ότι η απλή τροποποίηση του καθαρισμένου καθαρού πολυμερούς επηρεάζει την αποικοδόμηση. Για παράδειγμα, η ακετυλίωση του άκρου του υδροξυλίου αυξάνει τη θερμοκρασία αποσύνθεσης κατά $26 \text{ }^\circ\text{C}$ και βελτιώνει τη μείωση του μοριακού βάρους. Προς το παρόν, υπάρχει μια γενική θεωρία ότι το φαινόμενο που οδηγεί στην αποικοδόμηση του PLA είναι η διαδικασία της απλής κοπής της αλυσίδας υδρόλυσης που καταλύεται από πρωτόνια. Δεδομένου ότι η αντίδραση είναι αναστρέψιμη, η καθαρότητα του πολυμερούς επηρεάζει τη διαδικασία αποικοδόμησης κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αντίδρασης σύνθεσης, δηλαδή, η καθαρότητα του πολυμερούς μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξηγήσει την κινητική αποικοδόμησης του PLA. Περαιτέρω, η κρυσταλλικότητα της ένωσης, όπως περιγράφηκε παραπάνω, καθορίζει τον ρυθμό αποικοδόμησης και την αυτοκατάλυση. Όταν το PLA υδρολύεται και αποικοδομείται σε βιολογικό περιβάλλον, συμμετέχουν και ένζυμα. Ωστόσο, ο συγκεκριμένος ρόλος των ενζύμων στην αντίδραση



είναι επί του παρόντος ασαφής. Δεν είναι γνωστό εάν η αντίδραση καταλύεται άμεσα ή αφαιρώντας τα παραπροϊόντα, έτσι ώστε η αντίδραση να είναι ευεργετική για την προώθηση της προόδου. Υποθέτοντας ότι το PLA αποικοδομείται κυρίως με υδρόλυση, η αποδόμηση του πολυλακτιδίου χωρίζεται σε δύο στάδια: τη μη ενζυματική τήξη των εστερικών ομάδων και την τυχαία κοπή πολυμερών χαμηλού μοριακού βάρους από μικροοργανισμούς για την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και νερού.

2.3 Σύνθεση PLA

Το πολυγαλακτικό οξύ μπορεί να παραχθεί χρησιμοποιώντας διαφορετικές οδούς. Γενικά, συνήθως χρησιμοποιούνται τρεις μέθοδοι για την παραγωγή PLA υψηλής μοριακής μάζας περίπου 100 000 Dalton [9].

Το πρώτο είναι ο άμεσος πολυμερισμός συμπύκνωσης, αλλά συνήθως οδηγεί σε πολυμερή χαμηλού μοριακού βάρους τα οποία στη συνέχεια μπορούν να μετατραπούν σε πολυμερή υψηλότερου μοριακού βάρους με την προσθήκη παραγόντων σύζευξης αλυσίδας.

Η δεύτερη μέθοδος είναι η αζεοτροπική αφυδατική συμπύκνωση όπου οργανικοί διαλύτες εισάγονται στο μείγμα αντίδρασης για να διευκολυνθεί η απομάκρυνση του νερού παράγοντας έτσι προϊόν υψηλότερου μοριακού βάρους.

Τρίτη μέθοδος είναι ο πολυμερισμός ringopening (ROP), όπου το PLA παράγεται με σχηματισμό μονομερούς λακτιδίου πρώτα και με τη βοήθεια καταλύτη στη συνέχεια μετατρέπεται σε τελικό προϊόν. Επιτρέπει την παραγωγή PLA με ελεγχόμενο μοριακό βάρος και ελέγχοντας την αναλογία της αρχικής συγκέντρωσης ισομερών D- και L-γαλακτικού οξέος, οι ιδιότητες του τελικού προϊόντος μπορούν να προσαρμοστούν για συγκεκριμένες ανάγκες.

Επί του παρόντος, μόνο δύο από τις αναφερόμενες μεθόδους χρησιμοποιούνται κυρίως στη βιομηχανική παραγωγή – ο άμεσος πολυμερισμός συμπύκνωσης και η ROP. Ωστόσο, εμφανίζονται νέες μέθοδοι, όπως ο πολυμερισμός που προκαλείται από μικροκύματα ή ο πολυμερισμός τήγματος/στερεάς κατάστασης, που θα μπορούσε να οδηγήσει σε ταχύτερη και φθηνότερη παραγωγή PLA.

Πολυμερισμός απευθείας συμπύκνωσης



Η πολυσυμπύκνωση του γαλακτικού οξέος είναι μια σχετικά απλή διαδικασία για την παραγωγή PLA. Τα μονομερή γαλακτικού οξέος με την παρουσία ομάδων υδροξυλίου και καρβοξυλίου μπορούν να υποστούν αυτοεστεροποίηση, η οποία οδηγεί σε αναστρέψιμο πολυμερισμό σταδιακής ανάπτυξης και παραγωγή νερού ως υποπροϊόντος. Οι υψηλές θερμοκρασίες και το κενό χρησιμοποιούνται για την απομάκρυνση του παραγόμενου νερού από το χύμα διάλυμα για τη μείωση της αναστρεψιμότητας της αντίδρασης, αλλά συνήθως εξακολουθεί να οδηγεί σε πολυμερή χαμηλού έως ενδιάμεσου μοριακού βάρους, κυρίως λόγω της παρουσίας νερού και ακαθαρσιών. Άλλα μειονεκτήματα αυτής της διαδρομής είναι η απαίτηση σχετικά μεγάλων αντιδραστήρων και τεράστιες καταναλώσεις ενέργειας για την απαραίτητη υψηλή θερμοκρασία και κενό που οδηγεί σε ακριβό τελικό προϊόν. Επιπλέον, το LA είναι γνωστό ότι υφίσταται ρακεμοποίηση σε υψηλές θερμοκρασίες, επομένως το τελικό προϊόν θα μπορούσε να είναι χαμηλότερη από την αναμενόμενη ποιότητα.

Για μεγάλο χρονικό διάστημα πιστευόταν ότι ένα πολυμερές υψηλού μοριακού βάρους δεν μπορούσε να επιτευχθεί μέσω πολυσυμπύκνωσης λόγω LA λόγω της εγγενούς δυσκολίας στην οδήγηση της ισορροπίας αφυδάτωσης προς την κατεύθυνση της εστεροποίησης - η οποία είναι απαραίτητη για να ληφθεί αρκετά υψηλό μοριακό βάρος PLA. Προτάθηκε μια λύση σε αυτό το πρόβλημα. Χρησιμοποιώντας είτε έναν οργανικό διαλύτη είτε έναν πολυλειτουργικό παράγοντα διακλάδωσης είναι δυνατός ο χειρισμός της ισορροπίας μεταξύ LA, H₂O και PLA για να ληφθεί ένα τελικό προϊόν υψηλής μοριακής μάζας μέσω άμεσης πολυσυμπύκνωσης. Ωστόσο, η χρήση πολυλειτουργικού παράγοντα διακλάδωσης οδηγεί σε πολυμερή σχήματος αστεριού, τα οποία παρουσιάζουν χαμηλότερες θερμοκρασίες τήξης, χαμηλότερες θερμοκρασίες κρυστάλλωσης και χαμηλότερο βαθμό κρυσταλλικότητας σε σύγκριση με τα γραμμικά πολυμερή, καθιστώντας τα έτσι πιθανώς ακατάλληλα για ευρύτερες εφαρμογές. Η χρήση οργανικών διαλυτών (π.χ. διφαινυλαιθέρας) απαιτεί πολύπλοκο έλεγχο της διαδικασίας που οδηγεί σε ακριβό PLA. Επιπλέον, είναι δύσκολο να αφαιρεθεί πλήρως ο διαλύτης από το τελικό προϊόν. Για να αποφευχθούν αυτά τα προβλήματα, αναπτύχθηκε μια νέα διαδικασία για την παραγωγή PLA υψηλού μοριακού βάρους με μειωμένο κόστος, που ονομάζεται πολυσυμπύκνωση τήγματος.

Πολυσυμπύκνωση τήξης



Η πολυσυμπύκνωση τήγματος για τη σύνθεση του PLA αναφέρθηκε για πρώτη φορά από τον Kimita και τους συνεργάτες του. Κατά τη διάρκεια της πολυσυμπύκνωσης τήγματος, το υδατικό διάλυμα L-γαλακτικού οξέος (LLA) αφυδατώνεται και ολιγομερίζεται για να ληφθούν ολιγομερή LLA, τα οποία στη συνέχεια πολυσυμπυκνώνονται για να παραχθεί ένα προπολυμερές PLA. Αυτό το προπολυμερές στη συνέχεια κρυσταλλώνεται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας πολυσυμπύκνωσης στερεάς κατάστασης (SSP) και τελικά πολυσυμπυκνώνεται σε στερεή κατάσταση κάτω από τη θερμοκρασία τήξης για να επιτευχθεί PLA υψηλού μοριακού βάρους.

Σύμφωνα με έργα του Kimita και των συναδέλφων, η εκτέλεση αυτής της αντίδρασης σε στερεή κατάσταση ευνοεί τον πολυμερισμό έναντι του αποπολυμερισμού ή άλλων πλευρικών αντιδράσεων. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της διαδικασίας κρυστάλλωσης του προκύπτοντος πολυμερούς, το εναπομείναν μονομερές και ο καταλύτης μπορούν να διαχωριστούν και να συγκεντρωθούν στο μη κρυσταλλικό μέρος επιτρέποντας στον σχηματισμό του πολυμερούς να φτάσει το 100%. Αυτή η διαδικασία οδήγησε σε PLA μοριακού βάρους πάνω από 600.000 Da σε σχετικά σύντομο χρονικό διάστημα, καθιστώντας το συγκρίσιμο με τα αποτελέσματα του πολυμερισμού με άνοιγμα δακτυλίου. Η πολυσυμπύκνωση τήγματος/Στερεάς κατάστασης απαιτεί το σύστημα καταλύτη για να είναι αποτελεσματικό, καθώς η διαδικασία που περιγράφεται από τους συγγραφείς πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας ενώσεις Sn(II) οι οποίες στη συνέχεια ενεργοποιήθηκαν από οξέα πρωτονίων που δρουν ως συν-καταλύτες. Επιπλέον, το αναφερόμενο υψηλότερο μοριακό βάρος επιτεύχθηκε μόνο μετά από 20 ώρες πολυσυμπύκνωσης στερεάς κατάστασης στους 150°C και υπό πίεση 0,5 Torr (~67 Pa). Επίσης, αναφέρθηκε ότι μετά από 20 ώρες, παρατηρήθηκε απότομη μείωση του μοριακού βάρους και της κρυσταλλικότητας. Επιπλέον, είναι προφανές από τον Πίνακα 2, ότι διαφορετικές μέθοδοι δοκιμάστηκαν για αυτή τη διαδικασία και συνήθως καταλήγει ή μπορεί να οδηγήσει σε πολυμερές PLA μοριακού βάρους άνω των 100.000 Da, αν και απαιτείται να διατηρεί υψηλή θερμοκρασία και δραστικά μειωμένη πίεση για εκτεταμένη χρονικές περιόδους. Καταβλήθηκαν πολλές προσπάθειες για την εκβιομηχάνιση αυτής της διαδικασίας, αλλά δεν ήταν επιτυχής λόγω του σχετικά αργού ρυθμού αντίδρασης, οδηγώντας έτσι σε πολύ μεγάλους χρόνους αντίδρασης που απαιτούνται για την επίτευξη



υψηλού μοριακού βάρους και, τουλάχιστον προς το παρόν, θεωρώντας αυτή τη διαδικασία οικονομικά αναποτελεσματική.

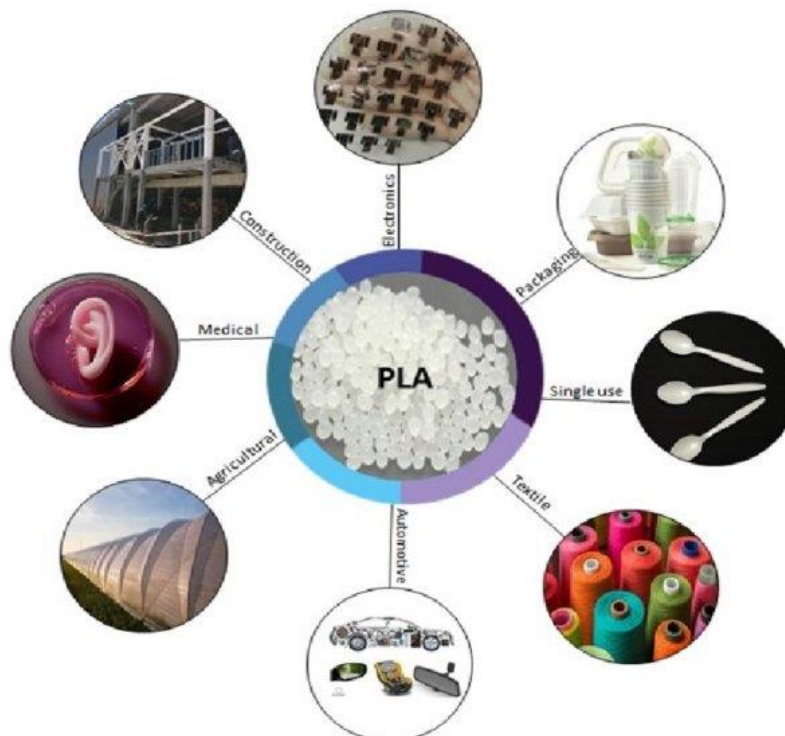
Πολυμερισμός με άνοιγμα δακτυλίου

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος απόκτησης PLA υψηλού μοριακού βάρους είναι μέσω του πολυμερισμού με άνοιγμα δακτυλίου (ROP). Το πολυμερές που προκύπτει σχηματίζεται από ένα ενδιάμεσο πολυσυμπύκνωσης γαλακτικού οξέος - το λακτίδιο. Το λακτίδιο είναι ένα κυκλικό διμερές του γαλακτικού οξέος, το οποίο σχηματίζεται με την απομάκρυνση του νερού από το μίγμα της αντίδρασης κατά τον ολιγομερισμό του γαλακτικού οξέος. Καθώς το Γαλακτικό Οξύ είναι μια οπτικά ενεργή ένωση, είναι δυνατόν να ληφθούν διαφορετικά λακτίδια που αντιστοιχούν στο μίγμα των εναντιομερών που υπάρχουν στην αρχή της αντίδρασης. Τρεις στερεομορφές λακτιδίου είναι δυνατές: L-λακτίδιο, D-λακτίδιο ή μεσο-λακτίδιο. Το σχηματισμένο λακτίδιο περνά στη συνέχεια μέσω ROP χρησιμοποιώντας συνήθως μεταλλικά αλκοξειδία ως καταλύτες με αποτέλεσμα τον πολυεστέρα υψηλού μοριακού βάρους - PLA. Ο πιο συχνά χρησιμοποιούμενος καταλύτης είναι ο οκτανοϊκός κασσίτερος (2-αιθυλεξανοϊκός κασσίτερος), λόγω της αποτελεσματικότητάς του και της χαμηλής τοξικότητάς του, καθιστώντας τον μια από τις καλύτερες επιλογές για χρήση για την παραγωγή βιοαποικοδομήσιμων και φιλικών προς το περιβάλλον πολυμερών όπως το PLA. Το PLA που προκύπτει και οι ιδιότητές του εξαρτώνται από το αρχικό μείγμα εναντιομερών γαλακτικού οξέος. Η χρήση ρακεμικού μίγματος θα οδηγήσει σε μεσο-λακτίδιο, καταλήγοντας έτσι στο πολυ-DL-λακτίδιο και στη συνέχεια σε ένα άμορφο τελικό πολυμερές. Πολλές σημαντικές ιδιότητες όπως ο βαθμός κρυσταλλικότητας μπορούν να ελεγχθούν από την αναλογία των εναντιομερών D και L που χρησιμοποιούνται στο αρχικό μείγμα. Τα πολυμερή με υψηλή συγκέντρωση L-ισομερούς παράγουν κρυσταλλικά προϊόντα, ενώ υψηλότερα επίπεδα D-ισομερών (πάνω από 15%) έχουν ως αποτέλεσμα ένα άμορφο τελικό προϊόν. Τα περισσότερα από τα εμπορικά προϊόντα L-PLA είναι ημικρυσταλλικά πολυμερή με υψηλό σημείο τήξης περίπου 180 °C και έχουν τη θερμοκρασία μετάπτωσης υάλου στην περιοχή 55 – 60 °C, καθώς είναι επιθυμητό το PLA να έχει κάποιο κρυσταλλικό περιεχόμενο για να ωφεληθεί η ποιότητα του τελικού προϊόντος.

2.4 Εφαρμογές

Ολοένα και περισσότεροι τομείς αξιοποιούν τις ιδιότητες του πολυγαλακτικού οξέος. Ενδεικτικά στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται οι κυρίαρχοι τομείς μέχρι τώρα που χρησιμοποιούν αυτό το υλικό.

- Κατασκευαστικός τομέας
- Ηλεκτρονικά
- Συσκευασίες τροφίμων
- Πλαστικά μιας χρήσης
- Υφαντουργία
- Αυτοκινητοβιομηχανία
- Ιατρική
- Γεωργικός τομέας



Εικόνα 6: Τομείς που χρησιμοποιείται το πολυγαλακτικό οξύ



2.5 Πλεονεκτήματα

Σε αυτή την ενότητα απαριθμούνται τα πλεονεκτήματα του PLA.

Πλεονέκτημα 1^ο : 100% βιοαποικοδομήσιμο, κομποστοποιήσιμο, φιλικό προς το περιβάλλον υλικό

Το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) είναι ένας νέος τύπος βιοαποδομήσιμου υλικού, κατασκευασμένο από πρώτες ύλες αμύλου που προτείνονται από ανανεώσιμες φυτικές πηγές (όπως το καλαμπόκι). Οι πρώτες ύλες αμύλου σακχαροποιούνται για να ληφθεί γλυκόζη, η οποία στη συνέχεια ζυμώνεται με γλυκόζη και ορισμένα στελέχη για να παραχθεί γαλακτικό οξύ υψηλής καθαρότητας και στη συνέχεια συντίθεται με χημική σύνθεση ένα πολυγαλακτικό οξύ ορισμένου μοριακού βάρους. Έχει καλή βιοδιασπασιμότητα και μπορεί να αποικοδομηθεί πλήρως από τους μικροοργανισμούς στη φύση μετά τη χρήση, και τελικά παράγονται διοξείδιο του άνθρακα και νερό χωρίς να μολύνουν το περιβάλλον. Αυτό είναι πολύ ευεργετικό για την προστασία του περιβάλλοντος και αναγνωρίζεται ως φιλικό προς το περιβάλλον υλικό.

Πλεονέκτημα 2^ο : Καλές μηχανικές και φυσικές ιδιότητες

Το πολυγαλακτικό οξύ είναι κατάλληλο για διάφορες μεθόδους επεξεργασίας, όπως χύτευση με εμφύσηση και θερμοπλαστικό, και χρησιμοποιείται για την επεξεργασία διαφόρων πλαστικών επιτραπέζιων σκευών μιας χρήσης από τη βιομηχανία έως την πολιτική χρήση, όπως μαχαιροπίρουνα, κουτάλια, πιάτα, πλαστικά προϊόντα, συσκευασμένα τρόφιμα, μη υφασμένα υφάσματα και βιομηχανία. Και στη συνέχεια επεξεργάζεται σε γεωργικά υφάσματα, υφάσματα υγειονομικής περίθαλψης, μαντηλάκια, είδη υγιεινής, υφάσματα εξωτερικού χώρου κατά της υπεριώδους ακτινοβολίας, υφάσματα σκηνών, πατάκια δαπέδου και ούτω καθεξής [10].

Φυσικές ιδιότητες του πολυγαλακτικού οξέος (PLA):

- Πυκνότητα: 1,20-1,30 kg/L
- Σημείο τήξεως: 155-185°C,
- Εγγενές ιξώδες IV: 0,2-8 dL/g
- Θερμοκρασία μετάπτωσης γυαλιού: 60-65°C,
- Συντελεστής μεταφοράς θερμότητας: 0,025 λ(w/m*k)



Πλεονέκτημα 3^ο : Καλή συμβατότητα και ικανότητα αποικοδόμησης

Λόγω της καλής συμβατότητας και της ικανότητας αποικοδόμησής του, το πολυγαλακτικό οξύ χρησιμοποιείται επίσης ευρέως στον ιατρικό τομέα. Για παράδειγμα, το πολυγαλακτικό οξύ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή εξοπλισμού έγχυσης μιας χρήσης, μη αποσυναρμολογούμενων χειρουργικών ραμμάτων και πολυγαλακτικού οξέος χαμηλού μοριακού βάρους ως παράγοντας συσκευασίας φαρμάκου παρατεταμένης αποδέσμευσης.

Πλεονέκτημα 4^ο : Καλή στιλπνότητα και διαφάνεια

Οι βασικές φυσικές ιδιότητες του πολυγαλακτικού οξέος (PLA) και των πετροχημικών συνθετικών πλαστικών είναι παρόμοιες, δηλαδή μπορεί να χρησιμοποιηθεί ευρέως για την κατασκευή διαφόρων προϊόντων εφαρμογής. Το πολυγαλακτικό οξύ έχει επίσης καλή γυαλάδα και διαφάνεια, η οποία είναι συγκρίσιμη με τις μεμβράνες από πολυστυρένιο και δεν μπορεί να παρέχεται από άλλα βιοδιασπώμενα προϊόντα.

Πλεονέκτημα 5^ο : έχει την καλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό και ολκιμότητα

Το πολυγαλακτικό οξύ μπορεί επίσης να παραχθεί σε μια ποικιλία κοινών μεθόδων επεξεργασίας, όπως χύτευση με εξώθηση τήγματος, χύτευση με έγχυση, χύτευση με φυσητό φιλμ, χύτευση με αφρό και χύτευση υπό κενό. Έχει παρόμοιες συνθήκες χύτευσης με τα ευρέως χρησιμοποιούμενα πολυμερή. Επιπλέον, έχει επίσης παραδοσιακή απόδοση εκτύπωσης ίδια με την ταινία. Με αυτόν τον τρόπο, το πολυγαλακτικό οξύ μπορεί να μετατραπεί σε μια ποικιλία προϊόντων εφαρμογής ανταποκρινόμενη στις ανάγκες διαφορετικών βιομηχανιών.

Πλεονέκτημα 6^ο: Έχει αντιβακτηριακές και αντιμυκητιακές ιδιότητες

Η μεμβράνη πολυγαλακτικού οξέος (PLA) έχει καλή διαπερατότητα αέρα, διαπερατότητα οξυγόνου και διαπερατότητα διοξειδίου του άνθρακα, και έχει επίσης τα χαρακτηριστικά απομόνωσης οσμής. Οι ιοί και οι μούχλες προσκολλώνται εύκολα στην επιφάνεια των βιοαποικοδομήσιμων πλαστικών, επομένως υπάρχουν ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια και την υγιεινή. Ωστόσο, το πολυγαλακτικό οξύ είναι το μόνο βιοδιασπώμενο πλαστικό με εξαιρετικές αντιβακτηριδιακές και αντιμυκητιακές ιδιότητες.



Πλεονέκτημα 7^ο: Ασφαλές και μη τοξικό

Όταν το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) αποτεφρώνεται, η θερμογόνος δύναμη της καύσης του είναι ίδια με αυτή του χαρτιού αποτέφρωσης, η οποία είναι η μισή από αυτή των παραδοσιακών πλαστικών (όπως το πολυαιθυλένιο). Επιπλέον, η αποτέφρωση του πολυγαλακτικού οξέος δεν θα απελευθερώσει ποτέ τοξικά αέρια όπως νιτρίδια και σουλφίδια. Το ανθρώπινο σώμα περιέχει επίσης γαλακτικό οξύ με τη μορφή μονομερούς, γεγονός που δείχνει την ασφάλεια αυτού του αποσυνθέσιμου προϊόντος.

Πλεονέκτημα 8^ο: Το PLA είναι η καλύτερη επιλογή για τρισδιάστατη εκτύπωση

Το PLA έχει χαμηλότερο σημείο τήξης από πολλά πετροχημικά πλαστικά και απαιτεί λιγότερη ενέργεια για μετατροπή. Λόγω του χαμηλού σημείου τήξης, του φθηνού, του εύκολου στην εκτύπωση και των χαρακτηριστικών του χωρίς καπνό. Το PLA έχει γίνει η καλύτερη επιλογή για τρισδιάστατη εκτύπωση.

2.6 Μειονεκτήματα

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται τα μειονεκτήματα του πολυγαλακτικού οξέος.

Μειονέκτημα 1^ο: Υψηλή τιμή

Το PLA είναι πιο ακριβό από τα πετροχημικά πλαστικά.

Μειονέκτημα 2^ο: Κομποστοποίησιμο, αλλά όχι αρκετά γρήγορα

Για τους βιομηχανικούς κομποστοποιητές, η ταχύτητα κομποστοποίησης δεν είναι αρκετά γρήγορη. Το υπόλειμμα δεν είναι κομπόστ. Δεν θα βελτιώσει την ποιότητα του εδάφους. Αλλάζει το pH του εδάφους και κάνει το έδαφος πιο όξινο.

Μειονέκτημα 3^ο: Χαμηλό σημείο τήξης

Το PLA έχει χαμηλό σημείο τήξης και δεν είναι κατάλληλο για περιβάλλοντα υψηλής θερμοκρασίας, ούτε μπορεί να αναμιχθεί με άλλα πλαστικά για ανακύκλωση.

Για παράδειγμα, όταν τοποθετηθεί το καλαμάκι PLA σε ένα φλιτζάνι με βραστό νερό, το καλαμάκι θα παραμορφωθεί αμέσως, καθιστώντας το άχρηστο. Επομένως, τα καλαμάκια PLA είναι κατάλληλα μόνο για κρύα ροφήματα, ενώ τα ζεστά ροφήματα απαιτούν τη χρήση καλαμιών υψηλής θερμοκρασίας CPLA.



Μειονέκτημα 4^ο: Υψηλή διαπερατότητα

Το PLA έχει υψηλότερη διαπερατότητα από άλλα πλαστικά. Η υγρασία και το οξυγόνο περνούν πιο εύκολα από άλλα πλαστικά. Αυτό θα οδηγήσει σε ταχύτερη αλλοίωση των τροφίμων, επομένως το PLA δεν συνιστάται για εφαρμογές μακροχρόνιας αποθήκευσης τροφίμων [11].



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο : ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΠΛΑΣΤΙΚΩΝ ΜΕ ΘΕΡΜΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟ ΣΕ EXTRUDER

Η πιο συχνή μέθοδος για την δημιουργία νήματος, ειδικότερα για έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή είναι αυτή της θερμομηχανικής σε extruder, ειδικά όσο αφορά πλαστικά. Αρκετοί θεωρούν πως είναι μια αρκετά απλή μέθοδος, πράγμα που ισχύει όσον αφορά τη χρήση της, όπως πίσω της κρύβει αρκετή μηχανική σκέψη.

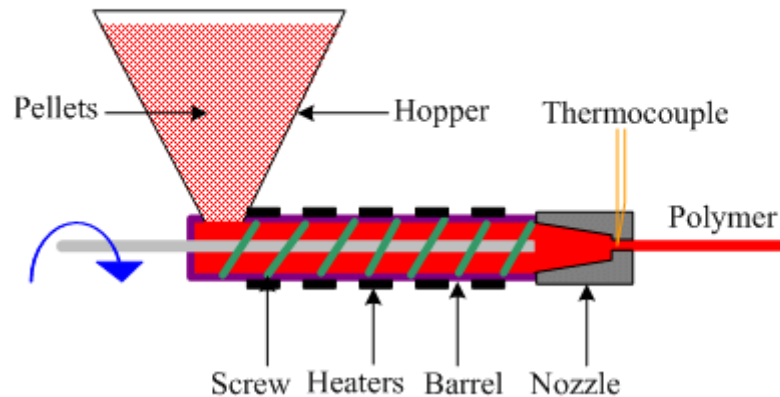
Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί η μέθοδος αυτή, καθώς και τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα, που μπορεί να φέρει σε κατασκευαστές νημάτων, αλλά και ερασιτέχνες που αποφασίζουν να ασχοληθούν με κάτι τέτοιο.

3.1. Αρχή λειτουργίας

Η αρχή λειτουργίας του extruder είναι αρκετά απλή και απεικονίζεται και στην παρακάτω εικόνα. Το επιθυμητό υλικό εισέρχεται μέσα στη συσκευή μέσω μιας χοάνης. Εδώ το υλικό που επιλέχθηκε ήταν σε μορφή κόκκων, σε άλλες περιπτώσεις μπορεί να είναι μια σκόνη ή και κάποια πρόσμιξη υλικών, που μπορεί να γίνει. Στη συνέχεια σκόπιμο είναι να μελετηθεί το κάθε πολυμερές που χρησιμοποιείται, όσον αφορά τις θερμοκρασίες που γίνεται ρευστό, καθώς στη μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται η θερμοκρασία ως μέσο μαλάκυνσης του υλικού. Το πολυγαλακτικό οξύ είναι γνωστό πως λιώνει περίπου στους 180-215°C, οπότε πρέπει να ρυθμιστεί η συσκευή περίπου στο ενδιάμεσο.

Το υλικό εισέρχεται από την χοάνη στο εσωτερικό της συσκευής, όπου συναντάει έναν κοχλία, ο οποίος περιστρέφεται και δίνει τη μηχανική πίεση που χρειάζεται το θερμαινόμενο υλικό για να βγει από τη μύτη του extruder το νήμα στο μέγεθος, το οποίο έχει καθοριστεί, έτσι ώστε να είναι αποδεκτό από τον τρισδιάστατο εκτυπωτή. Συνήθως τα νήματα είναι περίπου στο 1,75mm πάχος, για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για εκτύπωση ή στο 2,8mm που είναι κάποιο εκτυπωτές. Κατά την έξοδό του, το νήμα, από τη μύτη του extruder συναντάει ανεμιστηράκια ή άλλες μεθόδους ψύξης του υλικού και επανέρχεται στην στερεή του κατάσταση.

Extrusion of polymers



Εικόνα 7: Μέρη ενός extruder

Τα μέρη από τα οποία περνάει το υλικό μέσα σε έναν extruder είναι:

- i. Η χοάνη τροφοδοσίας, όπου από εκεί εισέρχονται στο σύστημα οι κόκκοι ή η σκόνη του υλικού.
- ii. Το σύστημα μετάδοσης θερμότητας και ο έλεγχος της θερμοκρασίας, όπου καθορίζεται η θερμοκρασία, που χρειάζεται κάθε υλικό για να λιώσει και μπορέσει να περάσει στον κοχλία
- iii. Ο κοχλίας, που αποτελεί το κύριο σώμα της συσκευής.
- iv. Το σύστημα μετάδοσης της κίνησης του κοχλία, δηλαδή ένας κινητήρας, που περιστρέφει τον κοχλία.
- v. Η μύτη του extruder, από το οποίο ρέει το υλικό και παίρνει τις κατάλληλες διαστάσεις.
- vi. Το επιλεγμένο σύστημα ψύξης του extruder, ώστε να στερεοποιηθεί πάλι το υλικό.

3.2. Πλεονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι πληθώρα και είναι τα παρακάτω

- Μικρό κόστος εξαρτημάτων
- Ευέλικτη λειτουργία
- Συνεχής λειτουργία



- Μεγάλοι όγκοι παραγωγής
- Μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλοί τύποι πρώτων υλών
- Καλή ανάμειξη (Compounding)
- Το φινίρισμα της επιφάνειας είναι καλό
- Καλές μηχανικές ιδιότητες που λαμβάνονται σε ψυχρή εξώθηση

3.3 Μειονεκτήματα

Τα μειονεκτήματα που θα μπορούσε κάποιος να βρει στην μέθοδο της εξώθησης είναι:

- Μπορεί το τελικό προϊόν να υποστεί κάποιες παραμορφώσεις
- Περιορισμένα προϊόντα λόγω διατομών
- Υψηλό αρχικό κόστος



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο : ΤΡΙΣΔΙΑΣΤΑΤΗ ΕΚΤΥΠΩΣΗ

FDM

Αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζει αναλυτικά την καινοτόμο τεχνολογία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, η οποία τα τελευταία 20 χρόνια έχει εξελιχθεί πολύ και έχει εισχωρήσει σε πολλούς τομείς της βιομηχανίας, αλλά ακόμα και στο σπίτι του καθημερινού ανθρώπου.

4.1 Ορισμός τρισδιάστατης εκτύπωσης

Η τρισδιάστατη εκτύπωση ή η κατασκευή πρόσθετων είναι η κατασκευή ενός τρισδιάστατου αντικειμένου από μοντέλο CAD ή ψηφιακό τρισδιάστατο μοντέλο. Μπορεί να γίνει σε μια ποικιλία διεργασιών στις οποίες το υλικό εναποτίθεται, ενώνεται ή στερεοποιείται υπό έλεγχο υπολογιστή, με υλικό να προστίθεται μαζί, όπως πλαστικά, υγρά ή κόκκοι σκόνης που συντήκονται, συνήθως στρώμα προς στρώμα.

4.2 Ταξίδι ως το σήμερα...

Το ταξίδι της τρισδιάστατης εκτύπωσης αν και μικρό στη διάρκειά του έχει πολύ σημαντικούς σταθμούς, οι οποίοι είναι άξιοι αναφοράς [12]:

- ✓ 1990: Πρώτο σύστημα EOS Stereos
- ✓ 1992: Δίπλωμα ευρεσιτεχνίας FDM στην Stratasys
- ✓ 1993: Ιδρύεται η Solidscape
- ✓ 1995: Η Z Corporation έλαβε αποκλειστική άδεια από το MIT
- ✓ 1999: Τα μηχανικά όργανα φέρνουν νέες προόδους στην ιατρική
- ✓ 2000: Δημιουργείται ένας τρισδιάστατος εκτυπωμένος νεφρός που λειτουργεί
- ✓ 2000: Η MCP Technologies (ένας καθιερωμένος OEM χύτευσης κενού) εισήγαγε την τεχνολογία SLM
- ✓ 2005: Η Z Corp. κυκλοφόρησε το Spectrum Z510. Ήταν ο πρώτος έγχρωμος τρισδιάστατος εκτυπωτής υψηλής ευκρίνειας στην αγορά.
- ✓ 2006: Ξεκινά ένα έργο ανοιχτού κώδικα (Reprap)
- ✓ 2008: Το πρώτο 3D εκτυπωμένο προσθετικό πόδι
- ✓ 2009: Διπλώματα ευρεσιτεχνίας FDM στο δημόσιο τομέα



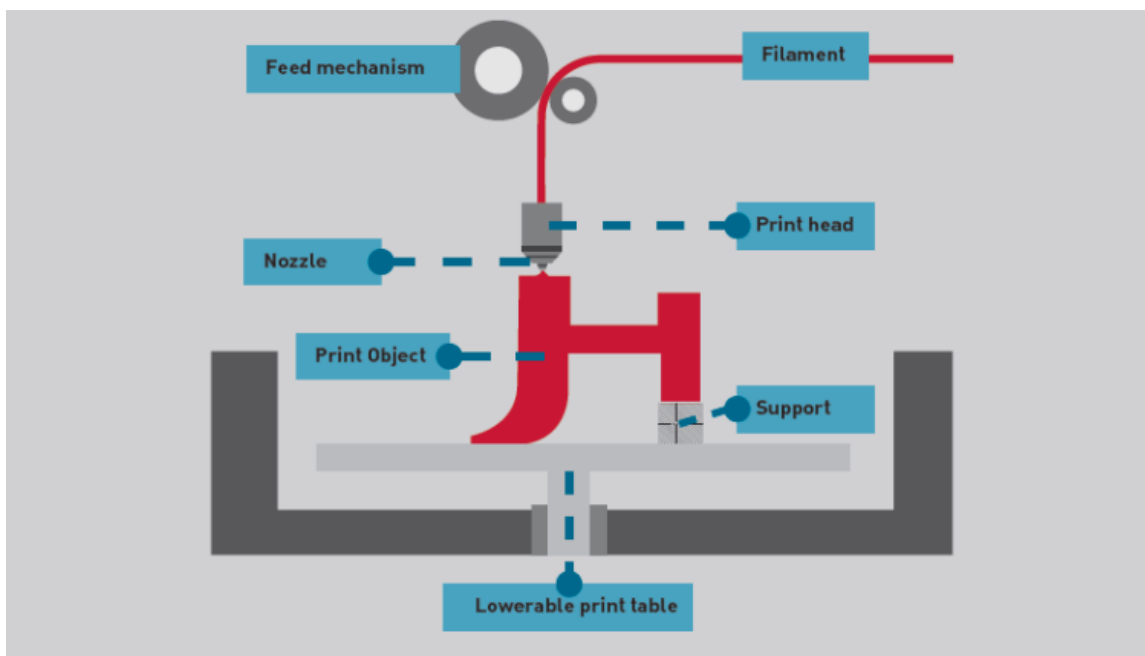
- ✓ 2009: Δημιουργείται το Sculpteo
- ✓ 2010: Το Urbee είναι το πρώτο τρισδιάστατο τυπωμένο πρωτότυπο αυτοκίνητο που παρουσιάζεται
- ✓ 2011: Το Πανεπιστήμιο Cornell άρχισε να κατασκευάζει τρισδιάστατο εκτυπωτή τροφίμων.
- ✓ 2012: Εκτυπώνεται και εμφυτεύεται η πρώτη προσθετική γνάθος
- ✓ 2013: «3D printing» στην ομιλία του Ομπάμα για την κατάσταση της Ένωσης
- ✓ 2015: Η Carbon 3D εκδίδει την επαναστατική εξαιρετικά γρήγορη μηχανή εκτύπωσης CLIP 3D
- ✓ 2016: Το εργαστήριο του Daniel Kelly ανακοινώνει ότι είναι σε θέση να εκτυπώσει 3D κόκκαλο
- ✓ 2018: Η πρώτη οικογένεια μετακομίζει σε ένα τρισδιάστατο εκτυπωμένο σπίτι

4.3 Fused Deposition Modeling (FDM)

4.3.1 Διαδικασία, υλικά και περιοχές εφαρμογής

Οι οικιακές εκτυπωτές συνήθως λειτουργούν με πλαστικό νήμα. Η τεχνολογία πίσω από αυτό αναφέρεται συχνά στο Fused Deposition Modeling (FDM) είναι μια τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης που λειτουργεί με εξώθηση ενός θερμοπλαστικού πολυμερούς μέσω ενός θερμαινόμενου ακροφυσίου το οποίο εναποτίθεται σε ένα στάδιο κτιρίου. Το FDM θεωρείται επίσης μια μορφή παραγωγής προσθέτων, η οποία ταυτόχρονα είναι μια «διαδικασία ένωσης υλικών για την κατασκευή αντικειμένων από δεδομένα τρισδιάστατων μοντέλων, συνήθως στρώμα επί στρώσης». Η δημιουργία ενός τρισδιάστατου εκτυπωμένου αντικειμένου μέσω FDM απαιτεί, καταρχήν, την εργασία σε ένα αρχείο STL (μορφή αρχείου στερεοφωνικής λιθογραφίας) το οποίο τεμαχίζει μαθηματικά και προσανατολίζει το μοντέλο για την επόμενη διαδικασία κατασκευής. Μερικές φορές, το λογισμικό είναι ικανό να δημιουργεί αυτόματα δομές υποστήριξης για το αντικείμενο. Γενικά, το μηχάνημα απαιτεί υλικά τόσο για το αντικείμενο όσο και για το στήριγμα. Η απλή διαδικασία περιλαμβάνει ένα πλαστικό νήμα το οποίο τροφοδοτείται από ένα καρούλι στο ακροφύσιο όπου το υλικό υγροποιείται και «τραβιέται» στην πλατφόρμα. Μόλις αγγίξει το στάδιο κατασκευής, το νήμα σκληραίνει ενώ εναποτίθεται σταδιακά, ακολουθώντας μια συγκεκριμένη δομή, ώστε να δημιουργηθεί η τελική τρισδιάστατη εκτύπωση. Όταν

σχεδιάζεται ένα στρώμα, το πάχος της πλατφόρμας μειώνεται κατά ένα στρώμα, έτσι ώστε ο εκτυπωτής να μπορεί να αρχίσει να εργάζεται στο επόμενο στρώμα.



Εικόνα 8: Μέθοδος FDM

Υπάρχουν πολλά διαφορετικά υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν με το FDM. Καταρχήν, χωρίζονται μεταξύ της βιομηχανικής και της καταναλωτικής κατηγορίας. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα είναι το ABS (ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο), το PLA (πολυακτικό οξύ) και το νάιλον (πολυαμίδιο), αλλά μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και άλλες εξωτικές ποικιλίες υλικών, όπως ένα μείγμα υλικών από πλαστικό και ξύλο ή άνθρακα. Επειδή αυτή η τεχνολογία παρουσιάζει μερικά πολύ καλά πλεονεκτήματα, το FDM χρησιμοποιείται συχνά στον τομέα των μη λειτουργικών πρωτοτύπων για την παραγωγή εξαρτημάτων, λειτουργικών μοντέλων, πρωτοτύπων γενικά, εργαλείων κατασκευής και μοντελοποίησης και εξαρτημάτων τελικής χρήσης. Πιο συγκεκριμένα, το FDM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για παραγωγή χαμηλού όγκου και πρωτότυπα που στοχεύουν σε δοκιμές μορφής, προσαρμογής και λειτουργίας. Ταυτόχρονα, χρησιμοποιείται πιο συχνά στον αεροδιαστημικό τομέα, για παράδειγμα, για την παραγωγή ανεμογεννητριών. Τα ανατομικά μοντέλα για ιατρική χρήση είναι επίσης πολύ



κατάλληλα για να κατασκευαστούν με αυτήν την τεχνολογία. Τέλος, η FDM επιτρέπει σιγά σιγά την ταχεία δημιουργία πρωτοτύπων βιοϊατρικών μικροσυσκευών, του είδους των συσκευών που χρησιμοποιούνται σε καθημερινή βάση στα νοσοκομεία, για παράδειγμα, επομένως πολύ θεμελιώδες, καθώς θεωρείται και φθηνό, αλλά ταυτόχρονα πολύ ασφαλές. Από το 2004, η τεχνολογία FDM χρησιμοποιείται σε έναν συγκεκριμένο τομέα για την παραγωγή φέρουσας σκαλωσιάς, η οποία, σύμφωνα με μια μελέτη, «έχει τη δυνατότητα επιδιόρθωσης οστεοχόνδριων ελαττωμάτων».

4.3.2 Δυνατά σημεία και αδυναμίες

Όσον αφορά την τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης, ένα από τα πρώτα προβλήματα σχετίζεται με το κόστος της. Ενώ γενικά είναι η μακροχρόνια χρήση υλικών που μπορεί να γίνει μια σοβαρή δαπάνη, όσοι θέλουν να ασχοληθούν με το Fused Deposition Modeling έχουν ένα πλεονέκτημα από την αρχή. Στην πραγματικότητα, οι εκτυπωτικές μηχανές FDM είναι από τις φθηνότερες και πιο προσιτές, ειδικά για όσους θέλουν να τις χρησιμοποιήσουν σε οικιακό περιβάλλον. Πολλές μάρκες σήμερα είναι διαθέσιμες προκατασκευασμένες όπως το Maker Bot και το Ultimaker, δύο από τους πιο δημοφιλείς επιτραπέζιους εκτυπωτές 3D, ή μπορούν να κατασκευαστούν χρησιμοποιώντας kit DIY ή εκτυπώνοντας εξαρτήματα για τη δημιουργία ενός 3D εκτυπωτή. Πάντα από τη θετική πλευρά, το FDM θεωρείται μια πολύ καθαρή τεχνολογία, συνήθως απλή στη χρήση και φιλική προς το γραφείο. Η τεχνολογία μπορεί επίσης να παράγει πολύπλοκες γεωμετρίες και κοιλότητες που διαφορετικά θα ήταν αρκετά προβληματικές.

Όσον αφορά την ακρίβεια, οι τρισδιάστατες εκτυπώσεις δεν φθάνουν στο ίδιο επίπεδο ακρίβειας και ποιότητας με άλλα αντικείμενα που παράγονται με τη χρήση Στερεολιθογραφίας. Τούτου λεχθέντος, το αποτέλεσμα θεωρείται αρκετά ποιοτικό, ανάλογα με τον τομέα στον οποίο εφαρμόζεται η τεχνολογία. Η ανάλυση εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος του ακροφυσίου που χρησιμοποιείται. Η ακρίβεια της μηχανής εξαρτάται από τις κινήσεις του εξωθητήρα στον άξονα X και Y, αλλά υπάρχουν και άλλοι παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Για παράδειγμα, η δύναμη συγκόλλησης μεταξύ των στρωμάτων είναι μικρότερη από ό,τι στο

Στερεολιθογραφική διαδικασία. Κατά συνέπεια, το βάρος των στρωμάτων μπορεί να πιέσει τα κατώτερα στρώματα, γεγονός που μπορεί επομένως να επηρεάσει ή ακόμη και



να διακυβεύσει την ποιότητα της τρισδιάστατης εκτύπωσης. Σε αντίθεση με το SLA, το FDM παρουσιάζει επίσης αυξημένη πολυπλοκότητα. Πρέπει να έχει κανείς κατά νου το βάρος και το μέγεθος, αλλά και τους περιορισμούς. Είναι πολύ σημαντικό να βεβαιωθείτε ότι μια εκτύπωση μπορεί να ανταποκριθεί στις προσδοκίες που βλέπει κανείς στην οθόνη κατά την πρώτη μοντελοποίηση. Οι περιορισμοί σε αυτήν την περίπτωση εξαρτώνται από διάφορους παράγοντες, αλλά κυρίως από το επιλεγμένο υλικό, μέσω του οποίου είναι δυνατό να κατανοήσουμε πόσο μεγάλο μπορεί να εκτυπωθεί ένα αντικείμενο μέσω FDM.

Μια άλλη αρνητική πλευρά του FDM είναι ότι παρουσιάζει γενικά πιο αργό σε σύγκριση με τη Stereolithography και την Selective Laser Sintering, η οποία θα αναλυθεί στη συνέχεια. Επιπλέον, το Surface φινίρισμα θεωρείται δίκαιο, αλλά όχι στο ίδιο επίπεδο με αυτές τις άλλες δύο τεχνολογίες. Στην πραγματικότητα, όταν εκτυπώνετε με FDM, πρέπει να λάβετε υπόψη ότι το πιθανότερο είναι ότι μια εκτύπωση θα απαιτήσει μεταγενέστερη επεξεργασία και φινίρισμα.

4.3.3 Πλεονεκτήματα FDM

- Η τεχνολογία FDM είναι προσιτή

Η τρισδιάστατη εκτύπωση FDM είναι μια από τις πιο προσιτές τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, αν όχι η πιο προσιτή. Μπορείτε να αγοράσετε έναν φτηνό επιτραπέζιο εκτυπωτή 3D FDM για μόλις 200 £.

Το γεγονός ότι οι εκτυπωτές FDM και FFF είναι τόσο προσιτές σημαίνει ότι είναι αυτοί που μπορείτε να βρείτε στα περισσότερα σπίτια, σχολεία και μικρές επιχειρήσεις, και αυτή η δημοτικότητα τους κάνει ακόμη πιο οικονομικούς. Μπορείτε να βρείτε ανταλλακτικά γρήγορα και φθηνά, και πολλές εταιρείες μπορούν να επισκευάσουν εκτυπωτές FDM εάν αποτύχουν.

Δεν υπάρχει ακριβή εγκατάσταση και εκπαίδευση. Δεν χρειάζεται να πληρώσετε έναν σύμβουλο για τη ρύθμιση του εκτυπωτή. Μπορείτε απλά να αγοράσετε το kit και να το συναρμολογήσετε μόνοι σας, εξοικονομώντας σας ένα αρκετά μεγάλο χρηματικό ποσό.

- Το FDM λειτουργεί με πολλά υλικά

Ορισμένες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, όπως η SLA, έχουν περιορισμένες επιλογές υλικού. Η FDM λειτουργεί με μια μεγάλη γκάμα νημάτων, η οποία σας προσφέρει



περισσότερες επιλογές όσον αφορά την τιμή και την ποιότητα. Μερικοί από τους τύπους νημάτων περιλαμβάνουν:

- Πολυγαλακτικό οξύ (PLA): Ένας φθηνός και εύχρηστος τύπος νήματος, που χρησιμοποιείται συχνά ως το πρώτο βήμα στην τρισδιάστατη εκτύπωση.
- Πολυαιθυλενο τερεφθαλική γλυκόλη (PETG): Αυτό το νήμα είναι ελαφρώς πιο ακριβό και πιο δύσκολο να κυριαρχήσει, αλλά ισχυρότερο και πιο ανθεκτικό από το PLA. Είναι ένα εξαιρετικό δεύτερο βήμα αφού κατακτήσετε την εκτύπωση με το PLA.
- Θερμοπλαστικές παραλλαγές (TPC, TPE και TPU): Αυτές οι παραλλαγές νήματος προσφέρουν πιο ευέλικτες, λαστιχένιες εκτυπώσεις. Τα μοντέλα δεν είναι τόσο στιβαρά όσο αυτά που εκτυπώνονται με PLA ή PETG.
- Ακρυλονιτρίλιο βουταδιένιο στυρένιο (ABS): Αυτό το νήμα προσφέρει εξαιρετική αντοχή, αντοχή στη θερμότητα και ποιότητα, αλλά είναι αρκετά δύσκολο να εκτυπωθεί, καθώς απαιτεί πολύ υψηλά επίπεδα θερμότητας και απελευθερώνει τοξικά αέρια.
- Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA): Μια τροποποιημένη έκδοση του ABS που δεν παραμορφώνεται τόσο εύκολα και δεν απελευθερώνει τόσα τοξικά αέρια κατά την εκτύπωση.
- Nylon (Πολυαμίδιο ή PA): Το νάιλον είναι ένα σκληρό νήμα για εκτύπωση, καθώς έχει συγκεκριμένες απαιτήσεις. Αλλά είναι δύσκολο να νικήσεις το νάιλον όσον αφορά τη σκληρότητα, την αντοχή στη θερμότητα, τη λειτουργία χωρίς τριβές και τη γενική χρησιμότητα.
- Τα μοντέλα FDM μπορούν να είναι πολύ λεπτομερή

Μπορείτε να ορίσετε το πάχος των στρώσεων που εκτυπώνετε, τουλάχιστον σε κάποιο βαθμό. Αυτό σημαίνει ότι μπορείτε να προσθέσετε πολλές λεπτές λεπτομέρειες στην εκτύπωση σας. Μόνο οι καλύτερες λεπτομέρειες δεν θα λειτουργήσουν καλά με την εκτύπωση 3D FDM.

- Τα νήματα FDM δεν μολύνονται εύκολα

Μια από τις απογοητεύσεις που αντιμετωπίζουν συχνά οι άνθρωποι όταν εκτυπώνουν 3D με ρητίνη, όπως με τους εκτυπωτές SLA, είναι η μόλυνση από ρητίνη. Δεδομένου ότι αυτοί οι εκτυπωτές λειτουργούν με λεκάνες ρητίνης, είναι εύκολο για τη σκόνη ή άλλους ρύπους



να εισχωρήσουν στη μπανιέρα και να μολύνουν τη ρητίνη, καθιστώντας την άχρηστη για εκτύπωση.

Επειδή η εκτύπωση 3D FDM τροφοδοτεί και λιώνει καρούλια συμπαγούς νήματος, η μόλυνση δεν είναι τόσο μεγάλο πρόβλημα. Λίγη σκόνη δεν θα επηρεάσει το αποτέλεσμα της εκτύπωσης. Στην πραγματικότητα, πιθανότατα θα καεί ή θα λιώσει καθώς το νήμα περνά μέσα από το ακροφύσιο.

Παρεμπιπτόντως, αυτό σας εξοικονομεί ακόμη περισσότερα χρήματα, καθώς το κόστος αντικατάστασης μιας μπανιέρας ρητίνης είναι πολύ υψηλό.

- Μπορείτε να εκτυπώσετε μεγάλες κατασκευές

Όλοι οι τρισδιάστατοι εκτυπωτές περιορίζουν τα μεγέθη κατασκευής τους ανάλογα με το μέγεθος του κρεβατιού εκτύπωσης. Αυτό που κάνει την εκτύπωση FDM διαφορετική είναι το γεγονός ότι είναι απείρως επεκτάσιμη. Εάν θέλετε να εκτυπώσετε 3D ένα ολόκληρο σπίτι, είναι θεωρητικά δυνατό εάν κάνετε τον τρισδιάστατο εκτυπωτή σας αρκετά μεγάλο. Αυτό δεν είναι δυνατό με τις περισσότερες άλλες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης, τουλάχιστον, όχι ακόμα.

Εάν θέλετε να εκτυπώσετε ένα μεγάλο μοντέλο, αλλά ο εκτυπωτής σας FDM 3D δεν είναι αρκετά μεγάλος, μπορείτε εύκολα να χωρίσετε το μοντέλο σας σε μέρη και να εκτυπώσετε το καθένα ξεχωριστά και στη συνέχεια να συναρμολογήσετε τα εξαρτήματα μετά την εκτύπωση.

- Η μοντελοποίηση συντηγμένης εναπόθεσης είναι εύκολη

Μετά το κόστος, ο δεύτερος λόγος για τον οποίο το FDM είναι τόσο δημοφιλές είναι πιθανώς λόγω της απλότητάς του. Εάν χρησιμοποιείτε ένα εύχρηστο νήμα όπως το PLA, μπορείτε να μάθετε πώς να εκτυπώνετε 3D ένα βασικό μοντέλο μέσα σε λίγα μόνο λεπτά. Το σύστημα είναι λογικό και κατανοητό.

Λόγω της δημοτικότητάς του, υπάρχει πληθώρα διαθέσιμων πόρων που σας διδάσκουν πώς να βελτιώσετε τις εκτυπώσεις σας χρησιμοποιώντας τη μοντελοποίηση εναπόθεσης. Η αναζήτηση ενός προβλήματος στο YouTube θα δώσει ατελείωτα αποτελέσματα όπου οι άνθρωποι δείχνουν τι ακριβώς πρέπει να κάνετε για να έχετε την καλύτερη δυνατή εκτύπωση FDM.



- Το FDM είναι σχετικά γρήγορο

Η μοντελοποίηση συντηγμένης εναπόθεσης δεν είναι ο ταχύτερος τύπος τρισδιάστατης εκτύπωσης. Η μοντελοποίηση ρητίνης εξακολουθεί να κρατά αυτό το στέμμα. Ούτε είναι γρήγορο. Μπορεί να χρειαστούν ώρες για να εκτυπωθεί, ανάλογα με το μέγεθος του μοντέλου και τις ρυθμίσεις που θα επιλέξετε.

Ωστόσο, αυτό το τελευταίο μέρος είναι κρίσιμο. Μπορείτε να αλλάξετε τις ρυθμίσεις της εκτύπωσης FDM στο βαθμό που να μπορείτε να εκτυπώνετε ταχύτερα ακόμη και από έναν εκτυπωτή ρητίνης σε ορισμένες περιπτώσεις. Όταν προετοιμάζετε το μοντέλο σας για εκτύπωση, μπορείτε να ορίσετε την ταχύτητα εκτύπωσης και το πάχος του στρώματος.

Και οι δύο αυτές ρυθμίσεις θα επηρεάσουν το πόσο γρήγορα τελειώνει η εκτύπωση. Έτσι, εάν θέλετε μια γρήγορη επίδειξη του σχεδίου σας χωρίς ιδιαίτερη ανησυχία για την ποιότητα εκτύπωσης, μπορείτε να εκτυπώσετε σχετικά γρήγορα χρησιμοποιώντας FDM.

4.3.3 Μειονεκτήματα FDM

Το γεγονός είναι ότι, όσο αξιoσημείωτο κι αν είναι το FDM, έχει και μερικά μειονεκτήματα.

- Περιορισμένη λεπτομέρεια

Αν και το FDM μπορεί να εκτυπώσει πολλές λεπτομέρειες, αυτή η λεπτομέρεια εξακολουθεί να είναι περιορισμένη. Μπορείτε να αλλάξετε το μέγεθος του ακροφυσίου και να προσδιορίσετε το πάχος της εξόδου εκτύπωσης στις ρυθμίσεις, αλλά δεν μπορείτε πραγματικά να πάτε περισσότερο από 0,4 mm. Αυτό θέτει ένα όριο στο πόσο ακριβείς μπορεί να είναι οι λεπτομέρειες της εκτύπωσής σας.

Το 0,4 χιλιοστά εξακολουθεί να είναι πολύ καλό και υπεραρκετό για τις περισσότερες εκδόσεις, αλλά δεν είναι τόσο λεπτό όσο η λεπτομέρεια που μπορείτε να επιτύχετε χρησιμοποιώντας έναν εκτυπωτή SLA.

- Η ποιότητα δεν είναι τέλεια

Η κύρια δύναμη της 3D εκτύπωσης FDM έγκειται στην κατασκευή του μοντέλου σας ένα στρώμα τη φορά. Δυστυχώς, αυτή είναι και μια από τις κύριες αδυναμίες του. Αυτή η προσέγγιση στρώμα προς στρώμα δημιουργεί μια τραχιά επιφάνεια με γραμμές όπου συναντώνται τα στρώματα. Αυτό το layering θα γίνει ακόμα πιο έντονο με γρήγορη ταχύτητα εκτύπωσης.



Είναι αρκετά εύκολο να κάνετε την επιφάνεια πιο λεία, αλλά αυτό απαιτεί επιπλέον χρόνο και προσπάθεια, ενώ η εκτύπωση SLA προσφέρει υψηλότερη ποιότητα και πιο ομαλή κατασκευή από την αρχή.

- Έλλειψη Δομικής Ακεραιότητας

Το ίδιο σύστημα στρωματοποίησης που μόλις αναφέραμε έχει επίσης μια άλλη αρνητική παρενέργεια: απώλεια της δομικής ακεραιότητας. Οι ραφές μεταξύ των στρωμάτων θα είναι πάντα πιο αδύναμες από την υπόλοιπη κατασκευή, επειδή το νήμα στα χαμηλότερα στρώματα θα έχει ήδη κρυώσει μέχρι να τοποθετήσει ο εκτυπωτής το επόμενο στρώμα, επομένως τα στρώματα δεν συγχωνεύονται πάντα όπως θα θέλατε προς την.

Μπορείτε να πάρετε σχεδόν οποιοδήποτε εκτυπωμένο μοντέλο FDM και να το χωρίσετε ή να το σπάσετε τραβώντας τα στρώματα χωρία. Αυτό μπορεί να μην είναι πρόβλημα στις περισσότερες περιπτώσεις, αλλά το FDM μπορεί να μην είναι ιδανικό εάν θέλετε να εκτυπώσετε κάτι πιο στιβαρό.

- Μπορεί να χρειαστείτε δομές υποστήριξης

Ανάλογα με το τι εκτυπώνετε, ίσως χρειαστεί να προσθέσετε δομές υποστήριξης καθώς σχεδιάζετε το μοντέλο σας. Οποιαδήποτε εκτεταμένη περιοχή χωρίς στήριγμα, όπως μια γέφυρα ή η οροφή ενός σπιτιού, θα κρεμάσει εάν δεν προσθέσετε υποστήριξη. Θυμηθείτε ότι ο εκτυπωτής σας FDM κολλάει ουσιαστικά μια λωρίδα λιωμένου πλαστικού πάνω σε μια άλλη για να φτιάξει το μοντέλο σας. Δεν μπορεί να κολλήσει το λιωμένο νήμα στον αέρα.

Αυτές οι δομές στήριξης απαιτούν χρόνο και προσεκτικό σχεδιασμό για να σχεδιαστούν σωστά, καθώς θα πρέπει να μπορείτε να τις αφαιρέσετε χωρίς υπερβολική προσπάθεια και χωρίς να αφήνετε ελαττώματα στο μοντέλο σας. Επίσης, η εκτύπωση των δομών στήριξης απαιτεί περισσότερο χρόνο και χρησιμοποιεί περισσότερο νήμα, χάνοντας μερικούς από τους πόρους σας στη διαδικασία, καθώς στο τέλος θα απορρίψετε τα στηρίγματα.

- Οι εκτυπωτές FDM ενδέχεται να εκφοβίσουν νέους χρήστες

Αν και η διαδικασία εκτύπωσης μοντελοποίησης εναπόθεσης είναι εύκολη στην εκμάθηση, οι περισσότεροι εκτυπωτές FDM και FFF πωλούνται ως κιτ, ειδικά οι φθηνότεροι. Αυτό



σημαίνει ότι πρέπει να συναρμολογήσετε τον τρισδιάστατο εκτυπωτή μόνοι σας, τουλάχιστον σε κάποιο βαθμό.

Ευτυχώς, οι περισσότεροι άνθρωποι που ενδιαφέρονται για την τρισδιάστατη εκτύπωση θα έχουν αρκετές τεχνικές γνώσεις για να το καταλάβουν, ακόμα κι αν το κάνουν με τη βοήθεια ενός εγχειριδίου χρήστη ή βίντεο στο YouTube. Αλλά μερικοί άνθρωποι βρίσκουν τη συναρμολόγηση πιο εκφοβιστική από το να μάθουν πώς να εκτυπώνουν 3D.

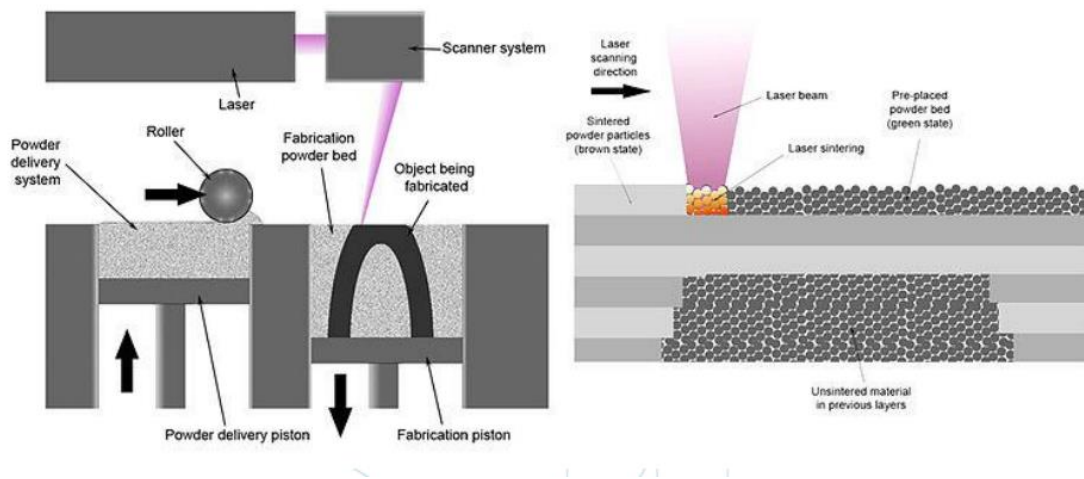
4.4 Άλλες κατηγορίες τρισδιάστατης εκτύπωσης

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται άλλες κατηγορίες τρισδιάστατης εκτύπωσης εκτός από την FDM [13].

4.4.1 SELECTIVE LASER SINTERING (SLS)

4.4.1.1 Διαδικασία, υλικά και περιοχές εφαρμογής

Η Selective Laser Sintering (SLS) είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί λέιζερ ως πηγή ενέργειας για να σχηματίσει στερεά τρισδιάστατα αντικείμενα. Αυτή η τεχνική αναπτύχθηκε από τον Carl Deckard, φοιτητή του Πανεπιστημίου του Τέξας, και τον καθηγητή του Joe Beaman τη δεκαετία του 1980. Αργότερα συμμετείχαν στην ίδρυση της Desk Top Manufacturing (DTM) Corp., η οποία πωλήθηκε στον μεγάλο ανταγωνιστή της 3D Systems το 2001. Το SLS κατά κάποιο τρόπο μοιάζει πολύ με το Selective Laser Sintering. Η κύρια διαφορά μεταξύ SLS και SLA είναι ότι χρησιμοποιεί κονιοποιημένο υλικό στον κάδο αντί για υγρή ρητίνη. Σε αντίθεση με τη στερεολιθογραφία και τη μοντελοποίηση συντηγμένης εναπόθεσης, η επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση με λέιζερ δεν απαιτεί τη χρήση δομών στήριξης, επομένως μειώνοντας την ποσότητα των υλικών που χρειάζεται κάποιος για την εκτύπωση. Το αντικείμενο, στην πραγματικότητα, τυπώνεται ενώ περιβάλλεται συνεχώς από μη πυροσυσσωματωμένη σκόνη. Η απλή διαδικασία περιλαμβάνει ένα λέιζερ το οποίο χρησιμοποιείται για την επιλεκτική πυροσυσσωμάτωση ενός στρώματος κόκκων, κατά συνέπεια συνδέοντας το υλικό μεταξύ τους για να δημιουργήσει μια στερεή μορφή. Στο τέλος της διαδικασίας, το αντικείμενο μπορεί να ζεσταθεί πολύ και επομένως θα αφαιρεθεί να κρυώσει πριν αφαιρεθεί από το μηχάνημα.



Εικόνα 9: Μέθοδος SLS

Η χρήση της τεχνολογίας SLS καθιστά δυνατή τη συμμετοχή μιας ποικιλίας υλικών που κυμαίνονται από νάιλον, γυαλί και κεραμικά, έως αλουμίνιο, ασήμι και ακόμη και χάλυβα. Ωστόσο, μερικά από αυτά, όπως τα κεραμικά, δεν είναι πυροσυσσωματωμένα με λέιζερ. Ένα συνδετικό υλικό, σε αυτήν την περίπτωση, χρησιμοποιείται για τη συγκόλληση εξαρτημάτων μεταξύ τους και αυτό είναι συνήθως γνωστό ως «Τριδιάστατη εκτύπωση με βάση την σκόνη και το δέσιμο». Η διαδικασία εκκίνησης αυτής της τεχνολογίας είναι αρκετά παρόμοια με το Laser Sintering: ένας κύλινδρος βάζει ένα λεπτό στρώμα σκόνης σε μια πλατφόρμα. Ωστόσο, αντί για δέσμη λέιζερ, μια ειδική κεφαλή εκτύπωσης τοποθετεί έναν συνδετικό παράγοντα σε συγκεκριμένα σημεία, εκτυπώνοντας ένα λεπτό στρώμα του μοντέλου σας που μπορεί να συνδεθεί με τα επόμενα στρώματα. Στη συνέχεια, αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται ξανά και ξανά μέχρι να ολοκληρωθεί το μοντέλο σας. Δεδομένου ότι σε αυτή την περίπτωση το μοντέλο ήταν μόνο "κολλημένο" μεταξύ τους, γίνεται κάποια μεταγενέστερη επεξεργασία. Τα ακριβή βήματα μεταεπεξεργασίας εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από το υλικό: Τα πολύχρωμα μοντέλα κάνουν μπάνιο με υπερκόλλα, οι κεραμικές εκτυπώσεις τοποθετούνται σε φούρνο στεγνώματος και ψήνονται πολλές φορές, αντικείμενα από ανοξείδωτο χάλυβα υψηλής λεπτομέρειας και χάλυβα τοποθετούνται σε φούρνο για τήξη. Τα μοντέλα από χάλυβα είναι επιπρόσθετα εμποτισμένα με Bronze για επιπλέον αντοχή.

Οι τομείς εφαρμογής της τεχνολογίας SLS κυμαίνονται από την αυτοκινητοβιομηχανία



στον τομέα των καταναλωτικών αγαθών. Πιο συγκεκριμένα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση ανάπτυξης προϊόντων και ταχείας δημιουργίας πρωτοτύπων σε ένα ευρύ φάσμα εμπορικών βιομηχανιών, καθώς και σε περιορισμένη παραγωγή ανταλλακτικών τελικής χρήσης. Στην αεροδιαστημική βιομηχανία, για παράδειγμα, η SLS συμμετέχει στην κατασκευή πρωτοτύπων για εξαρτήματα αεροσκαφών. Αυτό αντιπροσωπεύει ένα μεγάλο πλεονέκτημα για τις εταιρείες, επειδή τα αεροπλάνα παράγονται

μικρές ποσότητες αφού οι αεροπορικές εταιρείες, για παράδειγμα, τις χρησιμοποιούν για αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Επομένως, δεν είναι οικονομικά αποδοτικό για τις εταιρείες παραγωγής να κατασκευάζουν φυσικά καλούπια για εξαρτήματα αεροπλάνων. Στην πραγματικότητα, αυτά τα καλούπια θα ήταν πολύ ακριβά για να κατασκευαστούν και στη συνέχεια θα πρέπει να αποθηκευτούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα χωρίς να καταστραφούν ή να διαβρωθούν. Επομένως, το SLS είναι τέλειο για παραγωγή μικρών παρτίδων. Ακόμη πιο ενδιαφέρον είναι το γεγονός ότι το SLS έχει εισαχθεί σιγά σιγά στον κλάδο των καταναλωτικών αγαθών, ειδικά για την παραγωγή υποδημάτων. Σύμφωνα με τους παραγωγούς, η χρήση νάιλον πυροσυσσωματωμένου από SLS μπορεί να παράγει ένα παπούτσι όχι μόνο με μειωμένο βάρος, αλλά και προσαρμογές, ενώ μπορεί να προσαρμόσει το παπούτσι στις ανάγκες και τις απαιτήσεις του πελάτη.

4.4.1.2 Δυνατά σημεία και αδυναμίες

Ένα από τα πρώτα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το Selective Laser Sintering είναι το γεγονός ότι δεν χρησιμοποιεί δομές στήριξης, καθώς είναι πλήρως αυτοφερόμενο. Επομένως, επιτρέπει την κατασκευή εξαρτημάτων μέσα σε άλλα μέρη σε μια διαδικασία που ονομάζεται ένθεση. Αυτό έχει δύο βασικά αποτελέσματα. Το πρώτο είναι ότι μειώνει το κόστος του υλικού που θα χρησιμοποιηθεί επομένως για την παροχή δομών στήριξης, που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό στην τεχνολογία FDM. Το δεύτερο πλεονέκτημα σε αυτή την περίπτωση είναι ότι το SLS μπορεί να χειριστεί μια υψηλή πολυπλοκότητα γεωμετρίας. Ορισμένα προϊόντα είναι τόσο περίπλοκα που χωρίς αυτήν την τεχνολογία θα ήταν περίπλοκη η παραγωγή τους. Γενικά, το SLS θεωρείται η τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης με την ταχύτερη διαδικασία κατασκευής πρόσθετων για εκτύπωση λειτουργικών, ανθεκτικών πρωτοτύπων και εξαρτημάτων τελικού χρήστη. Η ανθεκτικότητα, επιπλέον, υποστηρίζεται από τη χρήση του



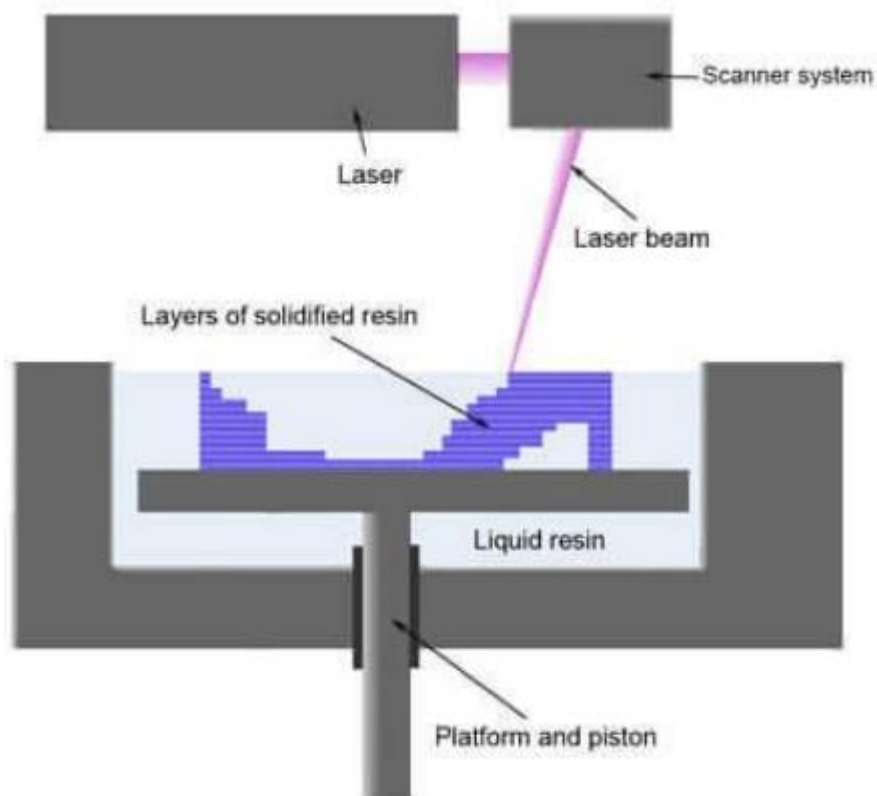
ισχυρά υλικά όπως το νάιλον, το οποίο επιτρέπει επίσης κάποια ελευθερία στη λειτουργικότητα της τελικής τρισδιάστατης εκτύπωσης. Εξάλλου, χάρη στις εξαιρετικές μηχανικές του ιδιότητες, το υλικό που χρησιμοποιείται στο SLS είναι συχνά υποκατάστατο των τυπικών πλαστικών χύτευσης με έγχυση.

Ταυτόχρονα, η SLS παράγει εξαρτήματα τα οποία γενικά χαρακτηρίζονται ως πολύ ισχυρά και άκαμπτα, με καλή χημική αντοχή. Πολύπλοκα μέρη με εσωτερικά εξαρτήματα, κανάλια, μπορούν να κατασκευαστούν χωρίς να παγιδευτεί το υλικό μέσα και να αλλοιωθεί η επιφάνεια από την αφαίρεση του στηρίγματος. Η ακρίβεια είναι ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα της τεχνολογίας SLS. Οι τελικές τρισδιάστατες εκτυπώσεις παρουσιάζουν, συνήθως, υψηλή ακρίβεια. Η απαιτούμενη διαδικασία είναι επίσης γρήγορη, σε σύγκριση με τις ήδη αναλυθείσες τεχνολογίες. Ταυτόχρονα, η επεκτασιμότητα επιτρέπει τη χρήση SLS για ένα μόνο μέρος του εξαρτήματος, αλλά και και εύκολα για δεκάδες κομμάτια παραγωγής. Τα ανταλλακτικά μπορούν συνήθως να αποσταλούν μεταξύ 1 και 4 ημερών, κάτι που αποτελεί μεγάλο πλεονέκτημα για τις εταιρείες που πρέπει να είναι γρήγορες στην αγορά. Ωστόσο, συνήθως οι εκτυπώσεις SLS παρουσιάζουν ένα ορισμένο επιφανειακό πορώδες, επομένως, όπως και στη Μοντελοποίηση Συντηγμένης Εναπόθεσης, απαιτείται σίγουρα η μετα-επεξεργασία.

4.4.2 STEREO LITHOGRAPHY (SLA)

4.4.2.1 Διαδικασία, υλικά και περιοχές εφαρμογής

Η στερεολιθογραφία (SLA) είναι μια διαδικασία βασισμένη στο φως που χτίζει μεμονωμένα στρώματα ενός μοντέλου με υγρό πολυμερές, που σκληρύνεται από μια δέσμη λέιζερ. Είναι η παλαιότερη τεχνολογία στην ιστορία της τρισδιάστατης εκτύπωσης, αλλά εξακολουθεί να χρησιμοποιείται πολύ στις μέρες μας. Η διαδικασία περιλαμβάνει τη χρήση μιας μηχανής εκτύπωσης που ονομάζεται «συσκευή στερεολιθογραφίας» η οποία μετατρέπει το υγρό πλαστικό σε στερεά τρισδιάστατα αντικείμενα. Το λέιζερ κατευθύνεται και ελέγχεται από δύο γαλβανόμετρα. Μετά από κάθε στρώση, η δεξαμενή ρητίνης ξεφλουδίζει για να απελευθερώσει το σκληρυμένο υλικό. Στη συνέχεια, η πλατφόρμα του κτιρίου ανεβαίνει από 25 έως 200 μικρά, ανάλογα με το επιλεγμένο ύψος στρώματος, για να προετοιμαστεί για τη διαδικασία στερεοποίησης του επόμενου στρώματος. Το τμήμα φαίνεται να είναι χτισμένο ανάποδα, το οποίο ονομάζεται αντίστροφη στερεολιθογραφία.



Εικόνα 10: Μέθοδος SLA

Όσον αφορά τα υλικά, η Στερεολιθογραφία προσφέρει μια ποικιλία επιλογών που μπορούν να συνοψιστούν σε τρεις κατηγορίες. Εντός του πρώτου, μπορεί να χρησιμοποιηθεί βάψιμο ρητίνη. Σε αυτή την περίπτωση, η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε μια μεγάλη δεξαμενή και ξεκινά όταν ένα στρώμα υγρού πολυμερούς απλώνεται σε μια πλατφόρμα. Ένα λέιζερ ελεγχόμενο από υπολογιστή τραβά το πρώτο στρώμα στην επιφάνεια ενός υγρού πολυμερούς, το οποίο σκληραίνει. Καθώς το μοντέλο χαμηλώνεται στη συνέχεια, το επόμενο στρώμα σχεδιάζεται απευθείας πάνω από το προηγούμενο και επαναλαμβάνεται μέχρι να τελειώσει το μοντέλο. Όταν ολοκληρωθεί το μοντέλο, ανυψώνεται έξω από τη δεξαμενή και η περίσσεια υγρού ρέει μακριά. Τα στηρίγματα αφαιρούνται χειροκίνητα μετά τη λήψη του μοντέλου από το μηχάνημα. Η διαφανής ρητίνη και το αρχικό γκρι είναι δύο άλλα είδη υλικών ρητίνης που μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν. Από έναν απλό μεγεθυντικό φακό μέχρι τον κυματοδηγό έως έναν διαφανή μηχανισμό ή σχεδόν απεριόριστα διακοσμητικά αντικείμενα, η διαφανής ρητίνη



μπορεί να προσφέρει εκπληκτικά αποτελέσματα. Ακριβώς όπως και με τις ημιδιαφανείς ρητίνες, αν κάποιος προσθέσει μερικά φώτα στο έργο του τυπωμένο με αυτό το υλικό, σίγουρα θα τραβήξει την προσοχή του κόσμου.

Αυτό το υλικό μπορεί να αναμειχθεί με χρωστικές πριν από την εκτύπωση, με αποτέλεσμα ένα ελκυστικό διαφανές έγχρωμο αντικείμενο. Η διαφάνεια ποικίλλει από ημιδιαφανές έως υδατοδιαφανές. Η διαφάνεια του νερού μπορεί να επιτευχθεί σε ειδικές περιπτώσεις και κατόπιν αιτήματος. Η διαφανής ρητίνη έχει εξαιρετική ποιότητα επιφάνειας. Η επιφάνεια είναι λεία και η όψη σκαλοπατιών της τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να μειωθεί με γυαλόχαρτο. Τα μοντέλα διαφανούς ρητίνης είναι βαμμένα με γυαλιστερό βερνίκι για την αποφυγή αποχρωματισμού από το υπεριώδες φως. Η φυσική επιφάνεια του μοντέλου διαφανούς ρητίνης σας είναι γνωστή ως βασικό φινίρισμα. Τα μοντέλα με βάση τη ρητίνη θα είναι πάντα πιο λεία από τα μοντέλα με βάση τη σκόνη. Η τεχνολογία που χρησιμοποιείται για το μοντέλο διαφανούς ρητίνης σας απαιτεί επιπλέον υλικό για την υποστήριξη του μοντέλου σας κατά τη διαδικασία εκτύπωσης, αλλά αυτά τα στηρίγματα αφαιρούνται προτού σκληρυνθεί το μοντέλο σας. Η επιφάνεια του τρισδιάστατου εκτυπωμένου μοντέλου ορίζεται από το υλικό και την τεχνολογία. Με βασικό φινίρισμα, ορισμένα στρώματα κτιρίου θα εξακολουθούν να είναι ορατά. Η επιλογή φυσικής επιφάνειας είναι πάντα η φθηνότερη. Ο αριθμός των βημάτων μετά το φινίρισμα καθορίζει επίσης το κόστος και την ποιότητα του μοντέλου διαφανούς ρητίνης σας. Το υλικό είναι διαφανές, αλλά όχι 100% διαυγές. Όταν ένα μοντέλο είναι συμπαγές με πάχος μεγαλύτερο από 2 cm, το τυπωμένο μέρος παρουσιάζει μια μπλε απόχρωση. Για το διαφανές φινίρισμα, το μοντέλο είναι βαμμένο με άχρωμο βερνίκι. Για διαφανή χρωματικά φινιρίσματα, προστίθεται χρωστική ουσία στο βερνίκι. Αντίθετα, το Grey Resin, παλαιότερα γνωστό ως Prime Grey, είναι κατάλληλο για οπτικά μοντέλα A-side με περιορισμένη λειτουργικότητα. Η επιφάνεια του υλικού είναι πολύ λεία, πολύ πιο λεία στην πραγματικότητα από όλα σχεδόν τα άλλα υλικά τρισδιάστατης εκτύπωσης. Το χρώμα είναι Air Force Grey και το υλικό είναι σχεδόν «πολυτελές» στην αφή. Το υλικό έχει μέτρια μηχανική αντίσταση. Η ελευθερία σχεδίασης είναι περιορισμένη λόγω της απαραίτητης δομής για την υποστήριξη των μοντέλων σας κατά την εκτύπωση. Τα μοντέλα που κατασκευάζονται σε γκρι ρητίνη χρησιμοποιούνται συνήθως ως μοντέλα έκθεσης υψηλής ποιότητας. Τα τμήματα σχεδίασης και μηχανικής χρησιμοποιούν τα μοντέλα ως οπτικά



πρωτότυπα ή για παρουσιάσεις, αλλά έχουμε παρατηρήσει ότι λειτουργεί πολύ καλά για μοντέλα χαρακτήρων και παιχνιδιών. Η διαφορά μεταξύ της διαφανούς ρητίνης και του αστικού γκρι παραμένει στο αποτέλεσμα που θέλει κανείς να πετύχει. Για παράδειγμα, το Prime Grey είναι εξαιρετικό όταν πρόκειται για την αντοχή του στην κρούση και την ακρίβεια στις λεπτομέρειες. Ταυτόχρονα, η βαμμένη ρητίνη επιτρέπει την επιλογή χρώματος κατά την επιλογή κάποιου, αλλά εξακολουθεί να χρειάζεται δομή στήριξης, περιορίζοντας επομένως την ελευθερία σχεδιασμού. Αυτό μπορεί να αποφευχθεί χρησιμοποιώντας το αρχικό γκρι.

Η στερεολιθογραφία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλούς τομείς. Σήμερα, οι τομείς της αυτοκινητοβιομηχανίας, της αεροδιαστημικής, των ιατρικών και των καταναλωτικών αγαθών είναι οι πιο δημοφιλείς. Μπορεί, στην πραγματικότητα, να εφαρμοστεί στο οικιακό πεδίο: μπορεί κανείς εύκολα να κάνει τρισδιάστατες εκτυπώσεις ξεκινώντας από το δικό του μοντέλο. Ταυτόχρονα, αυτή η τεχνολογία επιτρέπει την εκτύπωση ιατρικών μοντέλων ανατομικών ανθρώπινων μερών, τα οποία μπορούν να είναι πολύ χρήσιμα στην τάξη, για παράδειγμα, προκειμένου να δοθεί μια σωστή επισκόπηση της λειτουργικότητας του ανθρώπινου σώματος σε μια ομάδα μελετητών. Επομένως, αλλάζει τον τρόπο διδασκαλίας των θεμάτων και μπορεί να εφαρμοστεί σε τεχνικά μαθήματα όπως η επιστήμη, η μηχανική, αλλά και οι τέχνες και τα μαθηματικά.

4.4.2.2 Δυνατά σημεία και αδυναμίες

Μεταξύ όλων των τεχνολογιών τρισδιάστατης εκτύπωσης, η Στερεολιθογραφία είναι μία από τις καλύτερες. Η δύναμή του βασίζεται κυρίως στην υψηλή ανάλυση των 3D εκτυπώσεων. Επιτρέπει την εκτύπωση αντικειμένων με πολύ σύνθετες γεωμετρίες διατηρώντας ταυτόχρονα την ποιότητα και τις λεπτομέρειες. Στην πραγματικότητα, η ακρίβεια βαθμολογείται γενικά ως πολύ καλή σε αυτή την περίπτωση. Το SLA έχει να κάνει με την ακρίβεια και χρησιμοποιείται συχνά όπου η μορφή, η εφαρμογή και η συναρμολόγηση είναι κρίσιμα.

Αυτό οφείλεται ιδιαίτερα στη χρήση της ρητίνης, ιδιαίτερα των λεγόμενων φωτοπολυμερών υλικών. Τα τελευταία είναι, στην πραγματικότητα, υγρά υλικά που σκληρύνονται και σκληρύνονται. επιτρέπουν επίσης κάποια ελευθερία όσον αφορά τα χρώματα, την αδιαφάνεια και την ακαμψία, ενώ προσφέρουν εξαιρετική ποιότητα επιφάνειας.



Ταυτόχρονα, παρόλο που υπάρχουν πιο γρήγορες και πιο πρόσφατες τεχνολογίες, η Στερεολιθογραφία μπορεί να αποδώσει σωστά σε εύλογο χρονικό διάστημα, επιτρέποντας παράλληλα την εξοικονόμηση χρόνου σε εξαρτήματα υψηλής ακρίβειας. Με αυτόν τον τρόπο, πρωτότυπα, που είναι κοινή χρήση για τη Στερεολιθογραφία, μπορούν να κατασκευαστούν εύκολα και πιστά στον αρχικό σχεδιασμό. Επομένως, η πολυπλοκότητα δεν είναι πρόβλημα. Επιπλέον, η θετική πλευρά της χρήσης υλικού Στερεολιθογραφίας και ρητινών είναι η προσαρμογή, ειδικά στη μορφή του χρώματος που θέλει κανείς. Η εκτύπωση με σπρέι σε αυτή την περίπτωση είναι μία από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για να επιτευχθεί αυτό το αποτέλεσμα. Διατίθενται τέσσερα είδη χρωμάτων: dead matt, matt, satin και high gloss, το καθένα με διαφορετικό συντελεστή γυαλάδας. Όσο υψηλότερος είναι ο παράγοντας γυαλάδας, τόσο πιο λαμπερό θα φαίνεται το μοντέλο. Το χρώμα που ψεκάζεται σε μεγαλύτερες περιοχές θα παρουσιάζει μεγαλύτερες οπτικές διαφορές μεταξύ των διαφορετικών επιλογών βαφής. Μπορούμε να βάψουμε το μοντέλο σας με σπρέι για να ταιριάζει με τις ανάγκες σας ή μπορείτε επίσης να το κάνετε μόνοι σας στο σπίτι. Ωστόσο, το κόστος είναι μια από τις σημαντικότερες αδυναμίες στην περίπτωση της Στερεολιθογραφίας. Ενώ οι μηχανές τρισδιάστατης εκτύπωσης μπορεί να είναι περισσότερο ή λιγότερο προσιτές, τα φωτοπολυμερή υλικά μπορεί να είναι πολύ ακριβά, καθιστώντας τη συνηθισμένη χρήση αυτής της τεχνολογίας μη προσιτή σε όλους. Εξάλλου, αν και αυτοί διατίθενται σε διαφορετικά χρώματα, υπάρχει ακόμα περιορισμένη επιλογή φωτοπολυμερών. Τα μειονεκτήματα όσον αφορά τη Στερεολιθογραφία περιλαμβάνουν επίσης το γεγονός ότι οι υγρές ρητίνες είναι γενικά ερεθιστικές και τοξικές, επομένως πρέπει να ληφθούν ορισμένες προφυλάξεις για να εργαστείτε μαζί τους χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα εργαλεία και εξοπλισμό. Επιπλέον, οι εκτυπώσεις συνήθως απαιτούν καθαρισμό, κάτι που σε ορισμένες περιπτώσεις μπορεί να πάρει χρόνο και πολλή προσπάθεια. Η μετα-επεξεργασία είναι γενικά απαραίτητη εάν κάποιος θέλει να επιτύχει την υψηλότερη δυνατή ποιότητα. Αυτό θα εξαρτηθεί επίσης από το επιλεγμένο υλικό, το οποίο κατά συνέπεια θα οδηγήσει σε περισσότερα ή λιγότερα βήματα που πρέπει να ληφθούν. Δεν πρέπει να ξεχνάμε το γεγονός ότι η Στερεολιθογραφία σε αντίθεση με την αντίστοιχη τεχνολογία της που είναι το Selective Laser Sintering, απαιτεί δομές στήριξης, γεγονός που κάνει την τιμή πιο ακριβή, καθώς απαιτείται περισσότερο υλικό. Η διάκριση και η συνακόλουθη επιλογή μεταξύ αυτών των



δύο τεχνολογιών εξαρτάται κυρίως από το υλικό που θέλει να χρησιμοποιήσει κανείς και το αποτέλεσμα που θέλει να πετύχει.

4.4.3 PHOTOPOLYMER JETTING (POLYJET)

4.4.3.1 Διαδικασία, υλικά και περιοχές εφαρμογής

Το Photopolymer Jetting είναι μια τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρησιμοποιεί κεφαλές εκτύπωσης inkjet που λειτουργούν με εκτόξευση υγρών φωτοπολυμερών σε μια πλατφόρμα κατασκευής. Μόλις το υλικό φτάσει στην πλατφόρμα, σκληραίνει αμέσως με λαμπτήρες UV και σκληραίνει αμέσως, επιτρέποντας στο μηχάνημα να συνεχίσει να χτίζει τα επάνω στρώματα. Οι τομείς εφαρμογής περιλαμβάνουν πρωτότυπα, τα οποία μπορούν να κατασκευαστούν σε πολλαπλά υλικά με πολλά χρώματα και καλό φινιρίσμα επιφάνειας, αλλά το πιο σημαντικό είναι ότι υπάρχουν και κάποια διαφανή υλικά διαθέσιμα. Ως εκ τούτου, τα μέρη εκτόξευσης φωτοπολυμερούς χρησιμοποιούνται συχνά για οπτικές δοκιμές και δοκιμές μορφής και εφαρμογής. Τα σχέδια χύτευσης είναι επίσης ένας άλλος τομέας, μαζί με εργαλεία για χύτευση με έγχυση πολύ μικρών σειρών και πρωτοτύπων. Στις μέρες μας, το POLYJET χρησιμοποιείται πιο συγκεκριμένα για τη δημιουργία ιατροτεχνολογικών προϊόντων, τα βασικά που χρησιμοποιούνται σε καθημερινή βάση στα νοσοκομεία.

4.4.3.2 Δυνατά σημεία και αδυναμίες

Η θετική πλευρά αυτής της τεχνολογίας είναι ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν περισσότερα υλικά ταυτόχρονα, γεγονός που επιτρέπει την τελική εκτύπωση με περισσότερα από ένα χρώματα και. Μέσω της ανάμειξης αυτών των διαφορετικών αναλογιών υλικών, η εκτύπωση θα ταξινομηθεί λειτουργικά και θα κατασκευαστεί προκειμένου, για παράδειγμα, να δημιουργηθεί διαφορετική σκληρότητα ακτή σε διαφορετικές θέσεις του εξαρτήματος. Ένα από τα δυνατά σημεία αυτής της τεχνολογίας είναι επίσης ότι μπορεί να επιτύχει καλή ακρίβεια και φινιρίσματα επιφανειών. Παράλληλα, η διαδικασία θεωρείται αρκετά γρήγορη, στο ίδιο επίπεδο με άλλες τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης. Ωστόσο, ορισμένα από τα μειονεκτήματα σε αυτήν την περίπτωση περιλαμβάνουν το γεγονός ότι η χρήση περιορίζεται πολύ σε φωτοπολυμερή υλικά. Γενικά, τα προϊόντα που κατασκευάζονται από αυτό το υλικό θεωρούνται ότι δεν είναι ανθεκτικά στο χρόνο. Επιπλέον, η τιμολόγηση της τεχνολογίας, η οποία περιλαμβάνει



τόσο την αγορά μιας μηχανής όσο και τα σχετικά υλικά, είναι συνήθως ακριβή και η τεχνολογία γενικά αξιολογείται ως αρκετά περίπλοκη.

4.4.4 SELECTIVE LASER MELTING (SLM)

4.4.4.1 Διαδικασία, υλικά και περιοχές εφαρμογής

Το Selective Laser Melting είναι μια τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης που χρονολογείται από το 1995, από τα χέρια μιας ομάδας Γερμανών ερευνητών. Λειτουργεί χάρη στη χρήση ενός λέιζερ που επιλέγει και διανέμει το υλικό, το οποίο έρχεται σε μορφή σκόνης, σε μια πλατφόρμα κτιρίου. Η σκόνη τήκεται και κατανέμεται στρώμα-στρώμα. Με την επανάληψη της διαδικασίας της επικάλυψης της σκόνης και της τήξης όπου χρειάζεται, τα μέρη ενσωματώνονται κατά συνέπεια στην κλίνη σκόνης. Οι τομείς εφαρμογής για το SLM περιλαμβάνουν πρωτότυπα που παράγονται σε τυπικά μέταλλα για δοκιμές μορφής, προσαρμογής και λειτουργικότητας, εξαρτήματα στήριξης, εξαρτήματα μικρής σειράς και εργαλεία για έγχυση. Συγκεκριμένα, το SLM μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία οδοντιατρικών προϊόντων και ανατομικών εξαρτημάτων, καθώς και μηχανικών εξαρτημάτων, για παράδειγμα ελαφρών εξαρτημάτων που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή αεροσκαφών.

4.4.4.2 Δυνατά σημεία και αδυναμίες

Ένας σημαντικός παράγοντας αυτής της τεχνολογίας είναι ότι απαιτεί μια δομή στήριξης, η οποία αγκυρώνει μέρη και προεξέχουσες δομές στην πλατφόρμα κατασκευής. Αυτό επιτρέπει τη μεταφορά θερμότητας μακριά εκεί που το λέιζερ λιώνει τη σκόνη. Ως εκ τούτου, μειώνει τη θερμική καταπόνηση και αποτρέπει το τύλιγμα. Ο φάκελος κατασκευής μπορεί να γεμίσει από πολλά μέρη που κατασκευάζονται παράλληλα, αρκεί να είναι όλα προσαρτημένα στην πλατφόρμα κατασκευής. Η θετική πλευρά του Selective Laser Melting είναι ότι μπορεί να λειτουργήσει με τυπικά μέταλλα που μπορούν να έχουν υψηλή πυκνότητα έως και 99% και με καλές μηχανικές ιδιότητες, σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες παραγωγής. Διατίθεται ένα συνεχώς διευρυνόμενο σετ τυπικών μετάλλων. Τα μέρη μπορούν να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία όπως οποιοδήποτε εξάρτημα συγκόλλησης. Η ταχύτητα θεωρείται γενικά δίκαιη, το ίδιο ισχύει και για την ακρίβεια και το φινίρισμα της επιφάνειας. Η αρνητική πλευρά αυτής της τεχνολογίας είναι ότι η διαδικασία της χαρακτηρίζεται ως αργή. Το πιο σημαντικό, η



τιμολόγηση δεν είναι προσιτή σε όλους, γεγονός που καθιστά το SLM μη οικονομικά αποδοτικό. Τα επιφανειακά φινιρίσματα συχνά χρειάζονται μετα-επεξεργασία προκειμένου να επιτευχθούν καλύτερα αποτελέσματα.

4.4.5 ELECTRON BEAM MELTING (EBM)

4.4.5.1 Διαδικασία, υλικά και περιοχές εφαρμογής

Ακριβώς όπως το SLM, το Electron Beam Melting είναι μια πρόσθετη τεχνολογία τρισδιάστατης εκτύπωσης που μπορεί να παράγει μεταλλικά μέρη. Η απλή διαδικασία συνίσταται σε ένα λεπτό στρώμα μεταλλικής σκόνης που τήκεται επιλεκτικά από μια δέσμη ηλεκτρονίων. Τα μέρη κατασκευάζονται στρώμα-στρώμα στο στρώμα πούδρας. Η διαφορά με το SLM είναι ακριβώς ότι χρησιμοποιεί δέσμη αντί για λέιζερ. Το μηχάνημα διανέμει ένα στρώμα μεταλλικής σκόνης σε μια πλατφόρμα κτιρίου, ενώ τήκεται από τη δέσμη ηλεκτρονίων. Μετά από αυτό, η πλατφόρμα του κτιρίου χαμηλώνεται και η επόμενη μεταγενέστερη σκόνη μετάλλου θα επικαλυφθεί στην κορυφή των προηγούμενων στρωμάτων. Το EBM απαιτεί επίσης μια δομή υποστήριξης. Ο φάκελος του κτιρίου μπορεί να γεμίσει από πολλά μέρη τα οποία είναι κατασκευασμένα παράλληλα, αρκεί να είναι όλα προσαρτημένα στην πλατφόρμα του κτιρίου. Τα εξαρτήματα κατασκευάζονται στη συνέχεια υπό κενό. Οι τομείς εφαρμογής περιλαμβάνουν κυρίως τον οδοντιατρικό, τον ιατρικό και τον αυτοκινητιστικό τομέα. Πιο συγκεκριμένα, το EBM χρησιμοποιείται για τη δημιουργία ιατρικών εμφυτευμάτων και μοντέλων οστικού ιστού.

4.4.5.2 Δυνατά σημεία και αδυναμίες

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης EBM είναι ότι μπορεί να χρησιμοποιήσει τυπικά μέταλλα έως και 99% της πυκνότητας. Σε σύγκριση με την τήξη με λέιζερ, το EBM παράγει λιγότερη θερμική καταπόνηση σε μέρη και επομένως απαιτεί λιγότερη δομή στήριξης. Επιπλέον, η διαδικασία θεωρείται ταχύτερη από ό,τι στο SLM. Η ακρίβεια βαθμολογείται επίσης δίκαιη γενικά, αλλά την ίδια στιγμή η τεχνολογία μπορεί να χρησιμοποιήσει μόνο ένα περιορισμένο σύνολο υλικών. Τα μειονεκτήματα περιλαμβάνουν κυρίως την τιμολόγηση τόσο για μηχανές όσο και για υλικά, μπορεί να γίνει αρκετά ακριβό, στο ίδιο επίπεδο με το SLM. Τα βήματα μετά την επεξεργασία γενικά απαιτούν την αφαίρεση του περιβλήματος κατασκευής, της σκόνης, τη θερμική επεξεργασία, την αφαίρεση των στηρίξεων και των δομών μετά την κατεργασία και τέλος το φινιρίσμα της επιφάνειας, το οποίο ωστόσο



εναπόκειται στον καθένα να αποφασίσει εάν θα προχωρήσει με αυτή την έννοια μέσω μηχανικών ή χημική μετεπεξεργασία.

4.4.6 ELECTRON BINDER JETTING

4.4.6.1 Διαδικασία, υλικά και περιοχές εφαρμογής

Ακριβώς όπως στο POLYJET, το Electron Binder Jetting είναι μια τεχνολογία εκτύπωσης 3D που λειτουργεί μέσω της χρήσης κεφαλών εκτύπωσης inkjet που εφαρμόζουν έναν υγρό συνδετικό παράγοντα σε λεπτές στρώσεις σκόνης. Το μηχάνημα εκτόξευσης λειτουργεί με τρόπο που διανέμει ένα στρώμα στην πλατφόρμα κατασκευής, το οποίο ταυτόχρονα θα χαμηλώσει μόλις απλωθεί το επόμενο στρώμα σκόνης. Η διαδικασία συνεχίζει να επαναλαμβάνεται έως ότου τα μέρη ενσωματωθούν πλήρως στο κρεβάτι πούδρας.

Οι τομείς εφαρμογής της τεχνολογίας BJ περιλαμβάνουν την αρχιτεκτονική και τους μηχανολογικούς τομείς. Ένα συγκεκριμένο παράδειγμα προϊόντος που δημιουργήθηκε με BJ είναι οι γλάστρες και γενικότερα τα έπιπλα σπιτιού.

4.4.6.2 Δυνατά σημεία και αδυναμίες

Μία από τις θετικές πλευρές της χρήσης της τεχνολογίας BJ είναι ότι δεν υπάρχει ανάγκη για δομές στήριξης. Τα δομικά μέρη βρίσκονται στο στρώμα της μη συγκολλημένης σκόνης. Επομένως, ολόκληρος ο όγκος κατασκευής μπορεί να γεμίσει με πολλά μέρη, συμπεριλαμβανομένης της στοίβαξης και της πυραμίδας των εξαρτημάτων. Στη συνέχεια παράγονται όλα μαζί. Επιπλέον, το Binder Jetting λειτουργεί με σχεδόν οποιοδήποτε υλικό το οποίο, ωστόσο, πρέπει να είναι σε μορφή σκόνης. Το πιο σημαντικό, η διαδικασία θεωρείται γρήγορη, με πολύ χαμηλή πολυπλοκότητα και σχετικά χαμηλό κόστος επειδή τα σωματίδια σκόνης είναι κολλημένα μεταξύ τους, σε σύγκριση με το EBM όπου το υλικό τήκεται κάτω από προστατευτικό περιβάλλον αερίου. Ορισμένα μηχανήματα μπορούν επίσης να λειτουργήσουν με χρώματα και επομένως μπορούν να παράγουν χρωματιστά εξαρτήματα. Η αρνητική πλευρά είναι ότι το αποτέλεσμα παρουσιάζει εύθραυστα μέρη με περιορισμένες μηχανικές ιδιότητες.



4.5 Εφαρμογές Μεθόδου

Οι εφαρμογές της τεχνολογίας αυτής είναι πολλές. Αναφέρονται ενδεικτικά κάποιες [14]:

- Αεροναυπηγική
- Αυτοκινητοβιομηχανία
- Ιατρική
- Κοσμήματα
- Τέχνη/ Γλυπτική
- Μόδα
- Αρχιτεκτονική
- Βιομηχανία τροφίμων
- Κατασκευαστική

4.6 Πλεονεκτήματα

Όπως σε κάθε νέα τεχνολογία που γεννιέται, έτσι και στην τρισδιάστατη εκτύπωση υπάρχουν μερικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Σε αυτή την παράγραφο αναφέρονται τα πλεονεκτήματα [15]:

- I. Μικρότερης αξίας αλυσίδες: Η αξία του τελικού αντικειμένου δεν αυξάνεται πολύ κατά τα στάδια παραγωγής, όπως συνηθίζεται στις παραδοσιακές αλυσίδες αξίας. Λόγω της μικρής αλυσίδας παραγωγής των τρισδιάστατων αντικειμένων, η αξία των προϊόντων μεταβάλλεται ελάχιστα λόγω της προσθήκης αξίας κατά την παραγωγή.
- II. Μείωση κόστους παραγωγής: Οι πρώτες ύλες είναι αρκετά οικονομικές και εύκολες στο να βρεθούν. Δεν χρειάζεται το κόστος παραγωγής να είναι μεγάλο, καθώς τα προϊόντα βγαίνουν μόνο από έναν τρισδιάστατο εκτυπωτή και τα σχέδια από έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή.
- III. Άμεση επαφή παραγωγού-καταναλωτή: Λόγω της ιδιαιτερότητας της τεχνολογίας αυτής η επαφή μεταξύ καταναλωτών και κατασκευαστών είναι πιο άμεση από ότι σε οποιαδήποτε άλλη αλυσίδα παραγωγής. Εδώ οι ενδιαφερόμενοι πελάτες επιλέγουν το αντικείμενο προς εκτύπωση και έρχονται σε επαφή αμέσως με την



- εταιρεία η οποία μεταφέρει την παραγγελία στον σχεδιαστή και ξεκινάει η δημιουργία.
- IV. Λιγότερα προϊόντα σε απόθεμα : Χαρακτηριστικό της τρισδιάστατης εκτύπωσης είναι η παραγωγή κατά παραγγελία. Αυτός είναι και ο λόγος που δεν υπάρχουν φυσικά καταστήματα και κατ' επέκταση αποθέματα σε αποθήκες.
 - V. Μείωση της πολυπλοκότητας της παραγωγικής διαδικασίας: Δεν υπάρχουν πολλά και διαφορετικά μηχανήματα ώστε να υπάρχει σύγχυση στην παραγωγική διαδικασία. Τα βήματα είναι απλά και ακολουθούνται τα ίδια κάθε φορά.
 - VI. Εύκολη τροποποίηση των αντικειμένων: Κατά την δημιουργία του αντικειμένου στο ψηφιακό αρχείο, είναι εύκολη η τροποποίηση του ακόμη και όταν το αντικείμενο βρίσκεται στο τελικό στάδιο σχεδίασης.
 - VII. Γρηγορότερη παραγωγική διαδικασία: Δεν χρειάζεται να υπάρχουν μεγάλες ποσότητες παραγγελίες για να ξεκινήσει η παραγωγή ενός αντικειμένου κάτι το οποίο κάνει την διαδικασία περισσότερο απλή και γρήγορη συγκριτικά με τις κλασσικές παραγωγικές διαδικασίες.
 - VIII. Ευκολότερη αντιγραφή και επανασχεδίαση προϊόντων: Τα ψηφιακά αρχεία μετά το πέρας της κατασκευής διατηρούνται σε βάσεις δεδομένων επομένως η επανασχεδίαση ενός αντικειμένου είναι μια πολύ εύκολη διαδικασία.
 - IX. Ποικιλία κατασκευής σχημάτων : Ένας 3D εκτυπωτής μπορεί να φτιάξει αντικείμενα με πολλά διαφορετικά σχήματα κάθε φορά που εκτυπώνει. Οι παραδοσιακές μηχανές είναι λιγότερο ευέλικτες και έχουν περιορισμένο φάσμα σχηματισμών.

4.7 Μειονεκτήματα

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται τα μειονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής:

- I. Υψηλά κόστη για την αγορά των εκτυπωτών: Οι τιμές αγοράς των τρισδιάστατων εκτυπωτών είναι αρκετά υψηλές και κυμαίνονται από 500\$ έως 10000\$.
- II. Επαναλαμβανόμενες εκτυπώσεις μέχρι την τελειοποίηση του προϊόντος: Το γεγονός ότι μπορεί ο εκάστοτε σχεδιαστής να επεξεργαστεί το ψηφιακό αρχείο σε οποίο στάδιο και αν αυτό βρίσκεται ανάλογα με τις επιθυμίες του πελάτη είναι κάτι που δεν συναντούμε στις παραδοσιακές αλυσίδες παραγωγής. Αυτό κάποιες



- φορές μπορεί να αποτελεί και παράγοντα καθυστέρησης της δημιουργίας αντικειμένου και να επαναλαμβάνει ίδιες διαδικασίες παραπάνω από δυο φορές.
- III. Μικρές παραγόμενες ποσότητες: Σε μια μεγάλη αλυσίδα παραγωγής υπάρχει η δυνατότητα για την ταυτόχρονη παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων. Αυτό, δεν ισχύει και στην τρισδιάστατη παραγωγή. Εδώ, παράγεται ένα προϊόν την φορά με διάρκεια από λίγα λεπτά έως πολλές ώρες.
- IV. Αδύνατη η κατασκευή μεγάλων τμημάτων αντικειμένων: Οι περισσότεροι τρισδιάστατοι εκτυπωτές και ειδικά αυτοί που είναι φτιαγμένοι για οικιακή χρήση έχουν την δυνατότητα να εκτυπώνουν προϊόντα μέχρι ένα συγκεκριμένο μέγεθος και συνήθως όχι πολύ μεγαλύτερο από το δικό τους μέγεθος.
- V. Προστασία της προσωπικής ιδιοκτησίας: Η ύπαρξη ηλεκτρονικών καταστημάτων για παραγγελίες διάφορων αντικειμένων αναγκάζει τις περισσότερες εταιρείες να εκθέτουν τα αντικείμενα που σχεδιάζουν online σε διάφορες πλατφόρμες. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μην υπάρχει προστασία προσωπικών δεδομένων του σχεδιαστή.
- VI. Έλλειψη φυσικών καταστημάτων : Μέχρι στιγμής τα καταστήματα με προϊόντα που προέρχονται από τρισδιάστατη εκτύπωση είναι μόνο ηλεκτρονικά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την μερική αγνοία των μελλοντικών καταναλωτών.
- VII. Ισχυρή κατανάλωση ενέργειας : Το 2009, η έρευνα, σε ευνοϊκές συνθήκες προς το περιβάλλον, στο βιομηχανικό πρόγραμμα του MIT έδειξε ότι η τεχνολογία σύντηξης μεταλλικής σκόνης χρησιμοποιεί εκατοντάδες φορές μεγαλύτερη ηλεκτρική ενέργεια από την παραδοσιακή χύτευση ή μεταλλοτεχνία. Εξαιτίας αυτού, οι 3D εκτυπωτές είναι καλύτεροι για μικρές σειρές παρτίδων.



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο : ΔΙΕΘΝΗ ΠΡΟΤΥΠΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΠΟΛΥΜΕΡΩΝ

5.1 Πρότυπο εφελκυσμού

Το διεθνές πρότυπο υλικών ASTM D638-02a, όπου πρόκειται για τυπική μέθοδος δοκιμής για τις εφελκυστικές ιδιότητες των πλαστικών. Αυτή η μέθοδος δοκιμής καλύπτει τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων εφελκυσμού μη ενισχυμένων και ενισχυμένων πλαστικών με τη μορφή τυπικών δοκιμών σε σχήμα αλτήρα όταν δοκιμάζονται υπό καθορισμένες συνθήκες προ επεξεργασίας, θερμοκρασίας, υγρασίας και ταχύτητας μηχανής δοκιμής. Αυτή η μέθοδος δοκιμής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δοκιμή υλικών οποιουδήποτε πάχους έως 14 mm. Ωστόσο, για τη δοκιμή δειγμάτων με τη μορφή λεπτού φύλλου, συμπεριλαμβανομένης της μεμβράνης πάχους μικρότερου από 1,0 mm, η μέθοδος δοκιμής D882 είναι η προτιμώμενη μέθοδος δοκιμής. Υλικά με πάχος μεγαλύτερο από 14 mm πρέπει να μειωθούν με μηχανική κατεργασία. Αυτή η μέθοδος δοκιμής περιλαμβάνει την επιλογή προσδιορισμού της αναλογίας Poisson σε θερμοκρασία δωματίου. Αυτή η μέθοδος δοκιμής και το ISO 527-1 είναι τεχνικά ισοδύναμες. Αυτή η μέθοδος δοκιμής δεν προορίζεται να καλύψει ακριβείς φυσικές διαδικασίες. Αναγνωρίζεται ότι ο σταθερός ρυθμός κίνησης σταυροειδούς κεφαλής του τύπου δοκιμής αφήνει πολλά επιθυμητά από θεωρητική σκοπιά, ότι μπορεί να υπάρχουν μεγάλες διαφορές μεταξύ του ρυθμού κίνησης σταυροειδούς κεφαλής και του ρυθμού καταπόνησης μεταξύ των σημαδιών μέτρησης στο δείγμα, και ότι οι καθορισμένες ταχύτητες δοκιμής συγκαλύπτουν σημαντικές επιδράσεις χαρακτηριστικές των υλικών σε πλαστική κατάσταση. Επιπλέον, γίνεται αντιληπτό ότι οι διακυμάνσεις στο πάχος των δειγμάτων δοκιμής, που επιτρέπονται από αυτές τις διαδικασίες, προκαλούν διακυμάνσεις στην αναλογία επιφάνειας-όγκου τέτοιων δειγμάτων και ότι αυτές οι διακυμάνσεις μπορεί να επηρεάσουν τα αποτελέσματα της δοκιμής. Ως εκ τούτου, όπου είναι επιθυμητά άμεσα συγκρίσιμα αποτελέσματα, όλα τα δείγματα πρέπει να έχουν ίσο πάχος. Θα πρέπει να χρησιμοποιούνται ειδικές πρόσθετες δοκιμές όπου χρειάζονται πιο ακριβή φυσικά δεδομένα. Αυτή η μέθοδος δοκιμής μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δοκιμή φαινολικής χυτευμένης ρητίνης ή ελασματοποιημένων υλικών. Ωστόσο, όταν αυτά τα υλικά χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρική μόνωση, αυτά τα υλικά θα πρέπει να δοκιμάζονται σύμφωνα με τις μεθόδους δοκιμής D229 και τη μέθοδο



δοκιμής 651. Για τις ιδιότητες εφελκυσμού των σύνθετων υλικών ρητίνης-μήτρας ενισχυμένων με προσανατολισμένες συνεχείς ή ασυνεχείς δοκιμές υψηλού συντελεστή πρέπει να γίνονται σύμφωνα με Μέθοδος δοκιμής D3039/D3039M. Τα δεδομένα δοκιμής που λαμβάνονται με αυτήν τη μέθοδο δοκιμής είναι σχετικά και κατάλληλα για χρήση στον μηχανολογικό σχεδιασμό. Οι τιμές που αναφέρονται στις μονάδες SI πρέπει να θεωρούνται ως το πρότυπο. Οι τιμές που δίνονται στις παρενθέσεις είναι μόνο ενημερωτικές. Αυτό το πρότυπο δεν έχει σκοπό να αντιμετωπίσει όλες τις ανησυχίες για την ασφάλεια, εάν υπάρχουν, που σχετίζονται με τη χρήση του. Είναι ευθύνη του χρήστη αυτού του προτύπου να θεσπίσει κατάλληλες πρακτικές ασφάλειας και υγείας και να καθορίσει τη δυνατότητα εφαρμογής των κανονιστικών περιορισμών πριν από τη χρήση.

5.2 Πρότυπο κάμψης

Το διεθνές πρότυπο υλικών ASTM D790-10, όπου πρόκειται για μια τυπική μέθοδο δοκιμής για τις καμπτικές ιδιότητες μη ενισχυμένων και ενισχυμένων πλαστικών και ηλεκτρικών μονωτικών υλικών. Αυτές οι μέθοδοι δοκιμής καλύπτουν τον προσδιορισμό των ιδιοτήτων κάμψης μη ενισχυμένων και ενισχυμένων πλαστικών, συμπεριλαμβανομένων σύνθετων υλικών υψηλού συντελεστή και ηλεκτρικών μονωτικών υλικών με τη μορφή ορθογώνιων ράβδων χυτευμένων απευθείας ή κομμένων από φύλλα, πλάκες ή χυτευμένα σχήματα. Αυτές οι μέθοδοι δοκιμής είναι γενικά εφαρμόσιμες τόσο σε άκαμπτα όσο και σε ημιάκαμπτα υλικά. Ωστόσο, η αντοχή σε κάμψη δεν μπορεί να προσδιοριστεί για εκείνα τα υλικά που δεν θραύονται ή που δεν αποτυγχάνουν στην εξωτερική επιφάνεια του δοκιμίου εντός του ορίου καταπόνησης 5,0 % αυτών των μεθόδων δοκιμής. Αυτές οι μέθοδοι δοκιμής χρησιμοποιούν ένα σύστημα φόρτωσης τριών σημείων που εφαρμόζεται σε μια απλά υποστηριζόμενη δοκό.

5.3 Πρότυπο μικροσκληρότητας

Η σκληρότητα των υλικών μετράται με τη μέθοδο ASTM E384-17, όπου πρόκειται για μια πρότυπη μέθοδος δοκιμής για τη σκληρότητα των υλικών με μικροεγχύσεις. Καλύπτει τον προσδιορισμό της σκληρότητας της μικροενδόνησης των υλικών και επίσης δοκιμές μικροεσοχλήσεων που γίνονται με εσοχές Knoop και Vickers υπό δοκιμαστικές δυνάμεις στην περιοχή από $9,8 \times 10^{-3}$ έως 9,8 N (1 έως 1000 gf). Περιλαμβάνει μια ανάλυση των πιθανών πηγών σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν κατά τη δοκιμή μικροεσοχής και πώς αυτοί οι



παράγοντες επηρεάζουν την ακρίβεια, την προκατάληψη, την επαναληψιμότητα και την αναπαραγωγιμότητα των αποτελεσμάτων των δοκιμών.

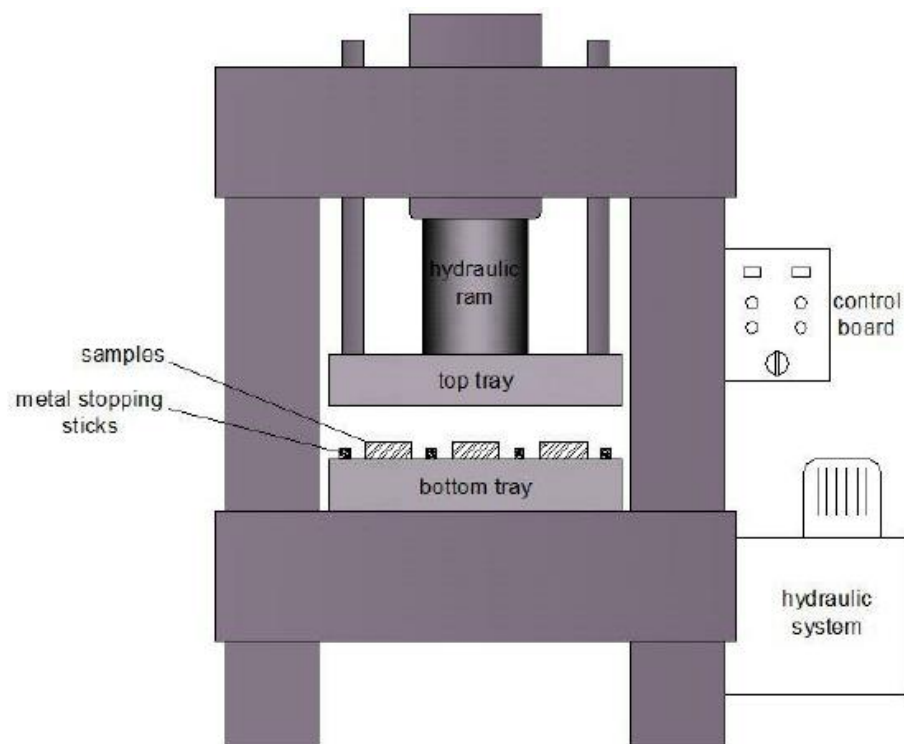
5.4 Πρότυπο κρούσης

Το διεθνές πρότυπο υλικών ASTM D6110-04, όπου πρόκειται για μία τυπική μέθοδο δοκιμής για τον προσδιορισμό της αντοχής σε κρούση Charpy των οδοντωτών δειγμάτων πλαστικών. Αυτή η μέθοδος δοκιμής χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της αντίστασης των πλαστικών στη θραύση λόγω καμπτικής κρούσης, όπως υποδεικνύεται από την ενέργεια που εξάγεται από τυποποιημένα σφυριά τύπου εκκρεμούς, τοποθετημένα σε τυποποιημένες μηχανές, στη θραύση τυπικών δειγμάτων με μία αιώρηση εκκρεμούς. Αυτή η μέθοδος δοκιμής απαιτεί τα δείγματα να γίνονται με φρεζαρισμένη εγκοπή. Η εγκοπή παράγει μια συγκέντρωση τάσης που προάγει ένα εύθραυστο, παρά ένα όλκιμο, κάταγμα. Τα αποτελέσματα αυτής της μεθόδου δοκιμής αναφέρονται ως προς την ενέργεια που απορροφάται ανά μονάδα πλάτους δείγματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο : ΘΕΡΜΟΠΡΕΣΑ (HOT PRESS MACHINE)

6.1 Τι είναι η εργαστηριακή μηχανή θερμής πίεσης

Η εργαστηριακή μηχανή θερμής συμπίεσης είναι κατάλληλη για εργαστηριακούς χρήστες που είναι αυστηροί σχετικά με τη θερμοκρασία συμπίεσης δειγμάτων, την ακρίβεια ελέγχου της πίεσης και χρειάζονται ένα καλούπι μεγάλου μεγέθους για τη συμπίεση δειγμάτων [16], [17].



Εικόνα 11:Θερμοπρέσσα

6.2 Εφαρμογή

Μια μηχανή θερμής συμπίεσης είναι μια συσκευή που θερμαίνει ενώ πιέζει ένα υλικό. Χρησιμοποιείται ευρέως σε διάφορους κλάδους όπως η επιστημονική έρευνα, η διδασκαλία, η φαρμακευτική, η καταλυτική, η χημική και η έρευνα και ανάπτυξη υλικών.



Η εργαστηριακή μηχανή θερμής συμπίεσης χρησιμοποιείται κυρίως για δοκιμή συμπίεσης δειγμάτων υψηλής θερμοκρασίας σκόνης, καουτσούκ, πλαστικής μεμβράνης και άλλων στερεών δειγμάτων. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μικρό όργανο βουλκανισμού. Αυτό το μηχάνημα είναι εύκολο στη χρήση και έχει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Αποτελεί ουσιαστικό εργαλείο για εργαστήρια που ασχολούνται με εργασίες έρευνας και ανάπτυξης.

6.3 Επιλογή

Αυτές είναι οι προϋποθέσεις για το πώς να επιλεγεί μια πρέσα εργαστηρίου [17]:

- Δείγμα σχήματος και μεγέθους που χρειάζεστε
- Πόσο φορτίο ή δύναμη θα πρέπει να ασκήσετε στο δείγμα;
- Απαιτήσεις μεγέθους εργαστηρίου
- Πόση δύναμη ή ενέργεια (εργασία) απαιτείται για την άντληση της πρέσας μέχρι το απαιτούμενο φορτίο;
- Το σύστημα ισχύος του πιεστηρίου εργαστηρίου επιλέγει χειροκίνητα, πνευματικά ή ηλεκτρικά;
- Ηλεκτρική χρήση και ασφάλεια
- Χρειάζεται μετακίνηση του εργαστηριακού πιεστηρίου;
- Πόσο κοστίζει για τις δυνατότητες που χρειάζεστε και πόσο θα προστεθεί σε αυτό το κόστος για προαιρετικές δυνατότητες;

Επιπλέον, υπάρχουν ορισμένα πράγματα που πρέπει να σημειώσετε σχετικά με τη μηχανή θερμής πίεσης:

- Θερμοκρασία που απαιτείται για την προετοιμασία του δείγματος
- Σφραγίδες για αγκώνες ατμού
- Συντήρηση εστίας
- Σφραγίδες για αγκώνες ατμού

Οι σφραγίδες συσκευασίας αμιάντου χρησιμοποιούνται συνήθως σε εργαστηριακές θερμικές πρέσες. Σε υψηλές θερμοκρασίες, η συσκευασία από αμιάντο μπορεί να σκληρύνει και να διαρρεύσει αέρας μέσα από αυτήν. Αυτό μπορεί να επηρεάσει την απόδοση της θερμικής πρέσας και να προκαλέσει ανησυχίες για την ασφάλεια.



Οι εργαστηριακές θερμές πρέσες έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν αεροστεγή στεγανοποίηση μεταξύ του θαλάμου υπό πίεση αέρα και της εξωτερικής ατμόσφαιρας. Η απόδοση στεγανοποίησης είναι απαραίτητη για την αποφυγή διαρροής αέρα και για τη διασφάλιση της ασφάλειας. Οι σφραγίδες τεφλόν είναι πιο αποτελεσματικές από τις σφαιρικές αρθρώσεις στην πρόληψη της διαρροής αέρα και γενικά διαρκούν περίπου 1 χρόνο.

Η εργαστηριακή θερμή πρέσα χρησιμοποιεί μια γραμμή αμιάντου βουτηγμένη σε πλαστικό PTFE στην αρχική συμπίεση του κουτιού γέμισης. Αυτό έχει καλό αποτέλεσμα, αλλά δεν είναι πολύ βολικό στη χρήση. Κατά την αντικατάσταση της τσιμούχας, ο δακτύλιος πίσω από τη σφαίρα πρέπει να αποκοπεί υπό γωνία 45° για να το ρυθμίσετε. Ωστόσο, αυτό δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα σφράγισης.

6.3 Τρόποι συντήρησης

Η επάνω επένδυση της πλάκας θερμής πρέσας προστατεύει την επιφάνεια της πλάκας θερμής πρέσας από ζημιά. Η κάτω επένδυση προστατεύει την πλάκα θερμής πρέσας από την επιφάνεια της πλάκας θερμής πρέσας. Και οι δύο επενδύσεις πρέπει να είναι κατασκευασμένες από υλικό που να μπορεί να αντέξει τις υψηλές θερμοκρασίες που δημιουργούνται από τη θερμή πρέσα.

Η πλάκα επένδυσης της εργαστηριακής θερμής πρέσας και η πλάκα θερμής πρέσας πιάνονται συχνά στη δέσμη ξύλου και σε άλλα βρώμικα πράγματα, επομένως η πλάκα επένδυσης πρέπει να αποσυναρμολογείται τακτικά για να αφαιρούνται τα βρώμικα πράγματα. Είναι επίσης απαραίτητο να προσέξετε εάν οι βίδες είναι χαλαρές, εάν η επιφάνεια της πλάκας επένδυσης είναι κατεστραμμένη, εάν το επίθεμα από καουτσούκ σιλικόνης είναι κατεστραμμένο και εάν το κενό μεταξύ της πλάκας επένδυσης και της πλάκας θερμής πρέσας είναι πολύ μεγάλο.

Η άνω επένδυση είναι το ανώτερο στρώμα της εργαστηριακής θερμής πρέσας. Συνήθως αλλάζει μια φορά την εβδομάδα για να γυαλίσει την επιφάνεια και να εξασφαλίσει την ποιότητα της τελικής σανίδας. Η επάνω επένδυση είναι κατασκευασμένη από ένα λείο, ανθεκτικό στη θερμότητα υλικό που βοηθά στην ομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας και της πίεσης κατά τη διαδικασία συμπίεσης.



Αυτό θα αποτρέψει την καταστροφή της επένδυσης κατά τη διαδικασία συμπίεσης.

Όταν κάνετε εργαστηριακά δείγματα θερμής πρέσας, είναι σημαντικό όλες οι πλάκες να έχουν το ίδιο μέγεθος και σχήμα. Διαφορετικά, τα αποτελέσματα του πειράματος θα μπορούσαν να αλλοιωθούν. Επομένως, τυχόν σπασμένες ή διαφορετικού μεγέθους πλάκες πρέπει να αφαιρεθούν πριν ενεργοποιηθεί η θερμή πρέσα.

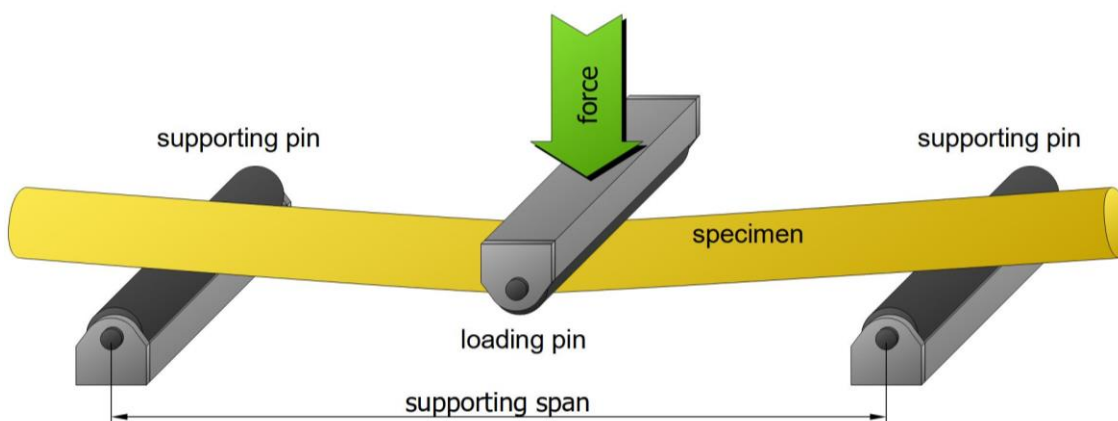
Οι εργαστηριακές θερμές πρέσες έχουν συνήθως μέγεθος πλάκας 200*200 mm. Τα περισσότερα μοντέλα έχουν μέγιστη ικανότητα θερμοκρασίας 350°C·F και μέγιστη ικανότητα πίεσης 40T. Ορισμένες πρέσες έχουν πρόσθετες δυνατότητες, όπως τη δυνατότητα κλίσης της πλάκας ή την εφαρμογή πίεσης κενού στην πλάκα.

Εάν πρόκειται να κλείσετε τη μηχανή θερμής πρέσας του εργαστηρίου σας για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, πρέπει να αποκλείσετε το συμπύκνωμα ατμού από την πλάκα θερμής πρέσας για να αποφύγετε την εσωτερική σκουριά. Είναι καλύτερο να χρησιμοποιήσετε ένα στεγνό πανί ή χαρτοπετσέτες για να απορροφήσετε το συμπύκνωμα και, στη συνέχεια, χρησιμοποιήστε μια βούρτσα ή πεπιεσμένο αέρα για να αφαιρέσετε τυχόν υπολείμματα από την επιφάνεια της πλάκας θερμής πρέσας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7^ο : ΚΑΜΨΗ ΤΡΙΩΝ ΣΗΜΕΙΩΝ

7.1 Ορισμός κάμψης

Η κάμψη ορίζεται ως το αποτέλεσμα κάθετων δυνάμεων ή ροπών, οι οποίες ασκούνται σε ένα σώμα σαν αυτό που απεικονίζεται παρακάτω. Όπως το σώμα τείνει να καμπυλωθεί στη μία πλευρά του προκαλείται θλίψη, δηλαδή συμπίεση και στην άλλη εφελκυσμός, δηλαδή τράβηγμα. Από αυτές τις δυνάμεις που ασκούνται το σώμα μπορεί να παραμορφωθεί ή ακόμα και να σπάσει [18].



Εικόνα 12: Κάμψη τριών σημείων

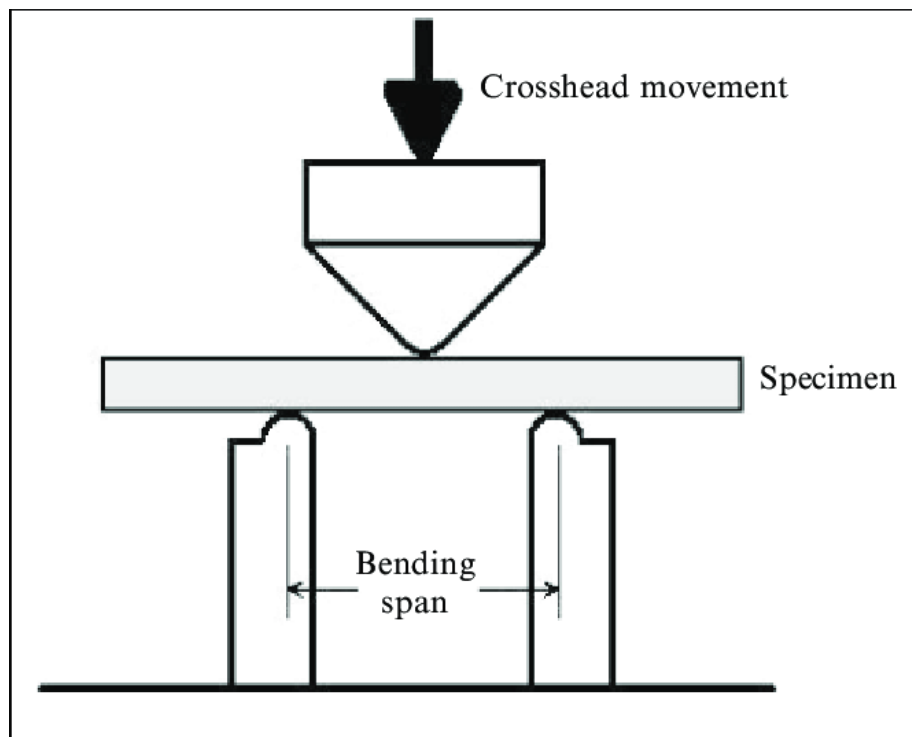
7.2 Εσωτερικές τάσεις

Για να υπάρχει ισορροπία σε ένα σώμα, πρέπει οι δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό να εξουδετερώνουν η μία την άλλη, σύμφωνα με τον τρίτο νόμο του Νεύτωνα, επομένως πρέπει οι δυνάμεις που ασκούνται σε κάθε σημείο του καμπτόμενου σώματος, να αλληλουξεξουδετερώνονται, δηλαδή οι εξωτερικές να εξουδετερώνονται από τις εσωτερικές δυνάμεις. Στο σώμα, το οποίο βρίσκεται σε κάμψη παρουσιάζονται εσωτερικές τάσεις, από τις οποίες οι κάθετες στη διατομή του στοιχείου λέγονται ορθές. Θετικές θεωρούνται οι εφελκυστικές δυνάμεις και αρνητικές οι θλιπτικές. Στην ουδέτερη γραμμή, όπως ονομάζεται, υπάρχει μηδενισμός των ορθών τάσεων και εκεί χωρίζεται και η εφελκυσόμενη από τη θλιβόμενη περιοχή. Ο υπολογισμός των τάσεων είναι πολύ σημαντικός για τον έλεγχο της αντοχής του σώματος.

7.3 Κάμψη τριών σημείων

Με βάση τη θεωρία του Bernoulli – Euler, παραλείπεται η επίδραση του συγκεντρωμένου φορτίου. Στο κέντρο μιας δοκού που υποβάλλεται σε κάμψη τριών σημείων, αναμένεται λόγω της επίδρασης του συγκεντρωμένου φορτίου, σημαντική διαταραχή του πεδίου των τάσεων.

Στα ισότροπα υλικά, δηλαδή αυτά που έχουν την ιδιότητα να διατηρούν τις ίδιες ιδιότητες σε όλο τον όγκο τους, η κατάσταση της επίπεδης τάσης όταν όλες οι επιδρώμενες τάσεις, ορθές και διαμητικές ενός στοιχειώδους κομματιού όγκου είναι μηδέν. Η κατάσταση επίπεδης παραμόρφωσης εμφανίζεται όταν οι παραμορφώσεις σ' ένα από τα ορθογώνια επίπεδα ενός στοιχειώδους κομματιού της δοκού είναι μηδέν.



Εικόνα 13: Κάμψη τριών σημείων



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8^ο : ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Η πειραματική διαδικασία που πραγματοποιήθηκε ήταν σχετικά απλή. Σε αυτό το κεφάλαιο με τη βοήθεια και των εικόνων που πάρθηκαν, κατά τη διάρκεια των πειραμάτων, γίνεται αντιληπτή η διαδικασία.

Αρχικά, όπως φαίνεται και στην εικόνα 14, ζυγίστηκε μια αρκετά μεγάλη ποσότητα υλικού, έτσι ώστε να προκύψει αρκετό νήμα για τα απαιτούμενα πειράματα.



Εικόνα 14: Ζυγισμένο PLA

Στη συνέχεια οι ζυγισμένοι κόκκοι του PLA τοποθετήθηκαν στον φούρνο στους 50° C, περίπου, έτσι ώστε να φύγει οποιαδήποτε υγρασία έχει εισχωρήσει στο υλικό, όπως φαίνεται στην εικόνα 15.

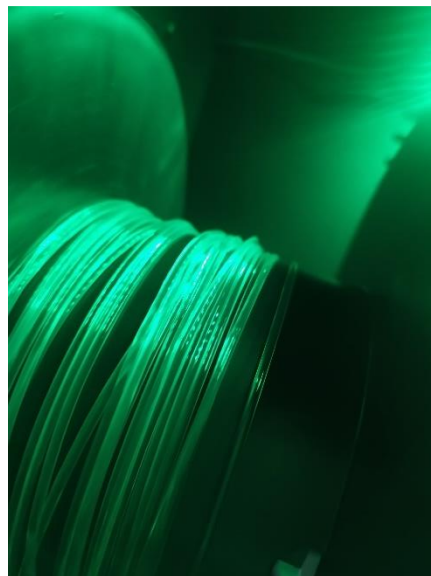


Εικόνα 15: Το ζυγισμένο υλικό στο φούρνο

Στη συνέχεια το υλικό έπρεπε να μεταφερθεί στον εξωθητή νήματος, έτσι ώστε οι κόκκοι να λιώσουν και να μετατραπούν σε νήμα, το οποίο σε επόμενο στάδιο θα χρησιμοποιηθεί από τον τρισδιάστατο εκτυπωτή. Ο εκτυπωτής που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκεκριμένη διαδικασία είναι ο extruder 3D Eno Composer 450, ο οποίος είναι ένας ένας μονοκόχλιος extruder, ο οποίος παράγει νήμα διαμέτρου από 1,65 έως 1,75mm. Οι διαστάσεις του είναι 50,6 x 21,7 x 61,5 και ζυγίζει 27 κιλά. Όπως φαίνεται και στην εικόνα 16 διαθέτει τέσσερις ζώνες θέρμανσης, επιτρέποντας τη μέγιστη θερμοκρασία να φτάνει τους 450°C. Αυτό δίνει τη δυνατότητα της επεξεργασίας πολλών υλικών. Άλλο πολύ καλό και χρήσιμο χαρακτηριστικό του είναι η ενσωμάτωση του συστήματος DevoVision, το οποίο μετράει σε πραγματικό χρόνο το πάχος του νήματος, έτσι σε περίπτωση κάποιου προβλήματος να μπορεί ο χειριστής να σταματάει τη διαδικασία για να μη σπαταλάται παραπάνω υλικό.



Εικόνα 16: Οι τέσσερις ζώνες θέρμανσης



Εικόνα 17: το παραγόμενο νήμα



Εικόνα 18: 3D Evo Composer 450

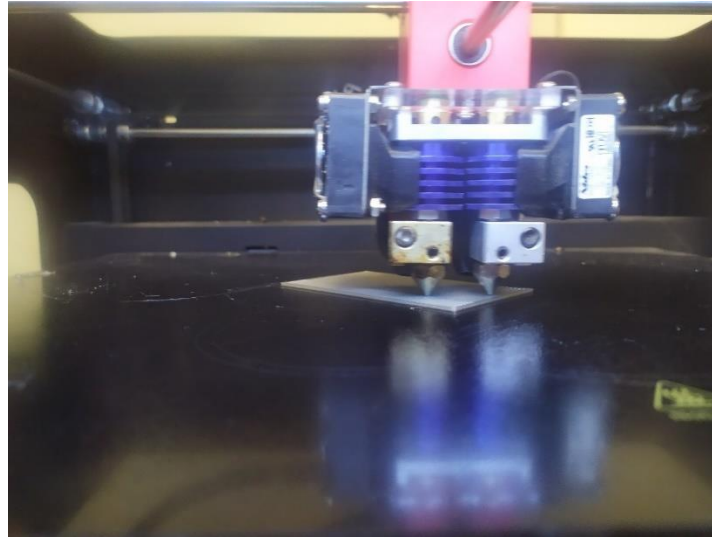


Εικόνα 19: 3D Evo Composer 450

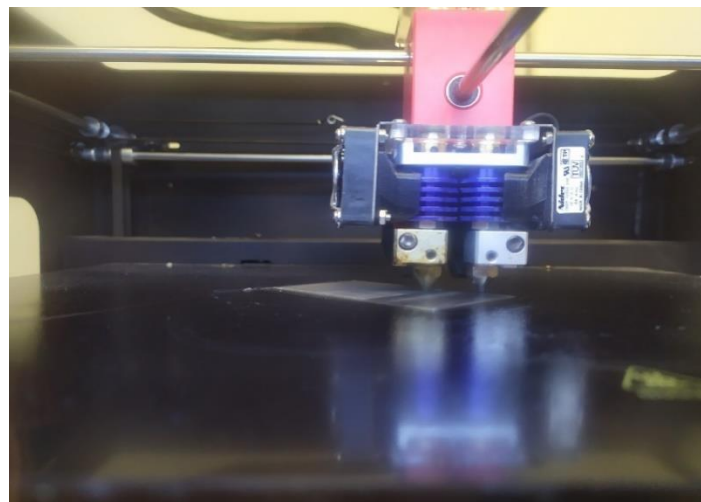
Στη συνέχεια το νήμα που βγήκε από το προηγούμενο στάδιο του πειράματος, τοποθετήθηκε στον τρισδιάστατο εκτυπωτή του εργαστηρίου, ο οποίος ήταν ο εκτυπωτής Intamsys Funmat HT. Βασίζεται στη μέθοδο FDM και είναι ένας κλειστός θάλαμος με θερμική σταθερότητα, χωρίς να υπάρχουν απώλειες και μπορεί να εκτυπώσει σε υψηλές αναλύσεις, καθώς φτάνει μέχρι και 50 μm . Οι διαστάσεις του είναι 260 x 260 x 260.



Οι ρυθμίσεις για την εκτύπωση ήταν για την πλατφόρμα κατασκευής οι 60°C, στα χαρακτηριστικά του βέβαια μπορεί να φτάσει έως τους 160°C, και ο extruder του στους 210°C, ενώ στα χαρακτηριστικά του μπορεί να φτάσει έως και 450°C.

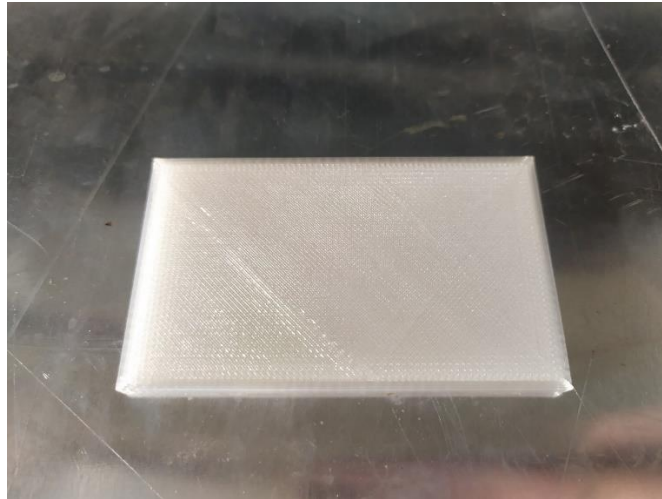


Εικόνα 20: Στιγμιότυπο εκτύπωσης

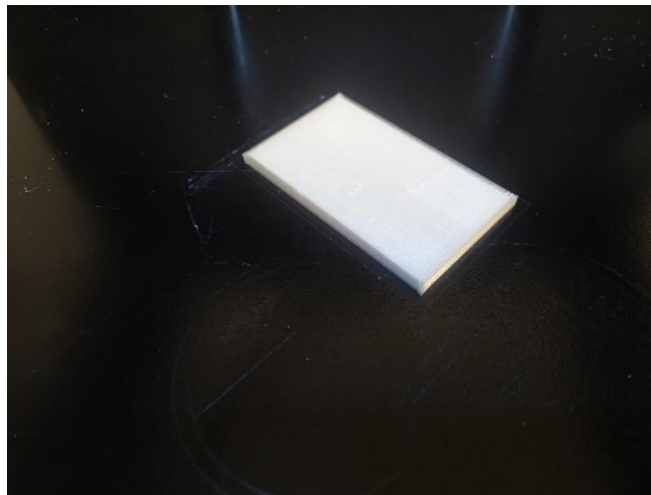


Εικόνα 21: Στιγμιότυπο εκτύπωσης

Στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζονται οι πλάκες που προέκυψαν μετά την εκτύπωση.

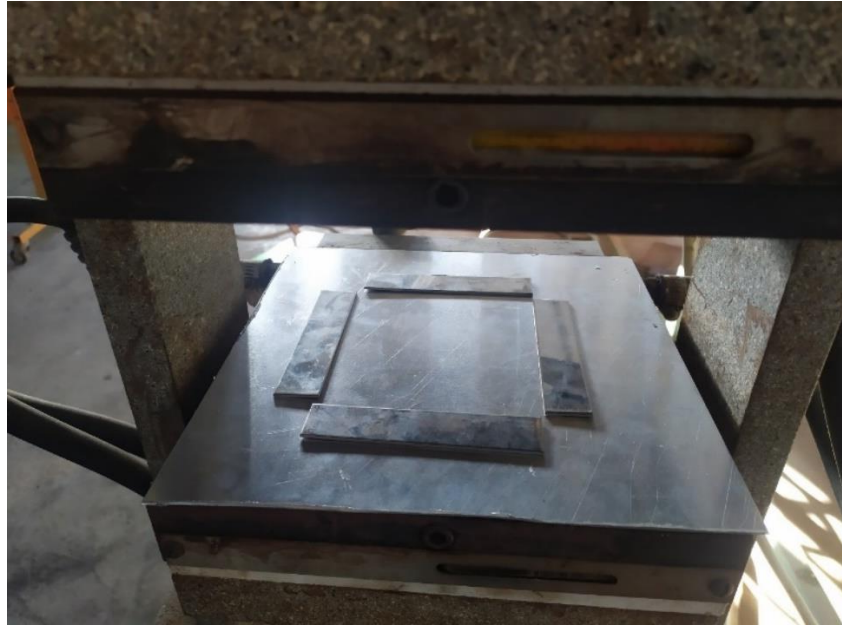


Εικόνα 22: Εκτυπωμένη πλάκα PLA

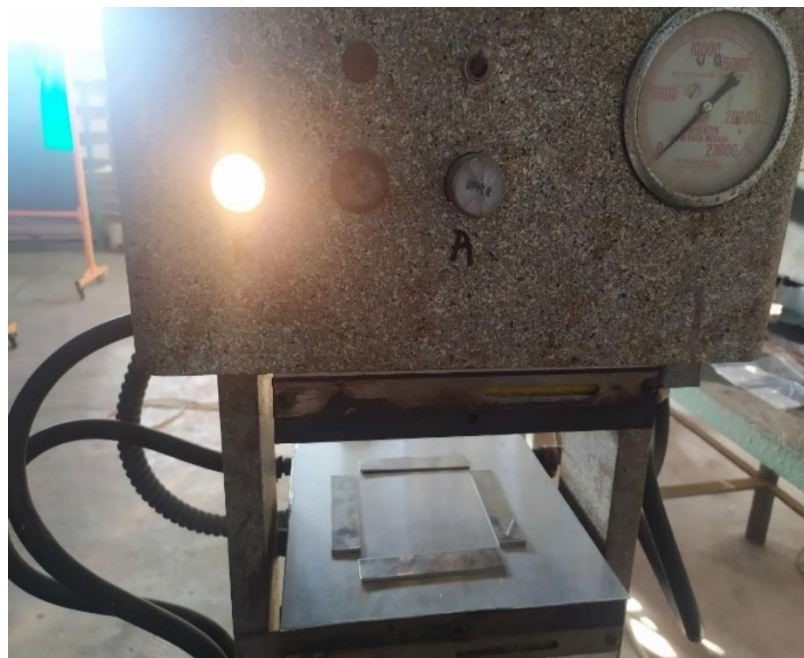


Εικόνα 23: Εκτυπωμένη πλάκα PLA

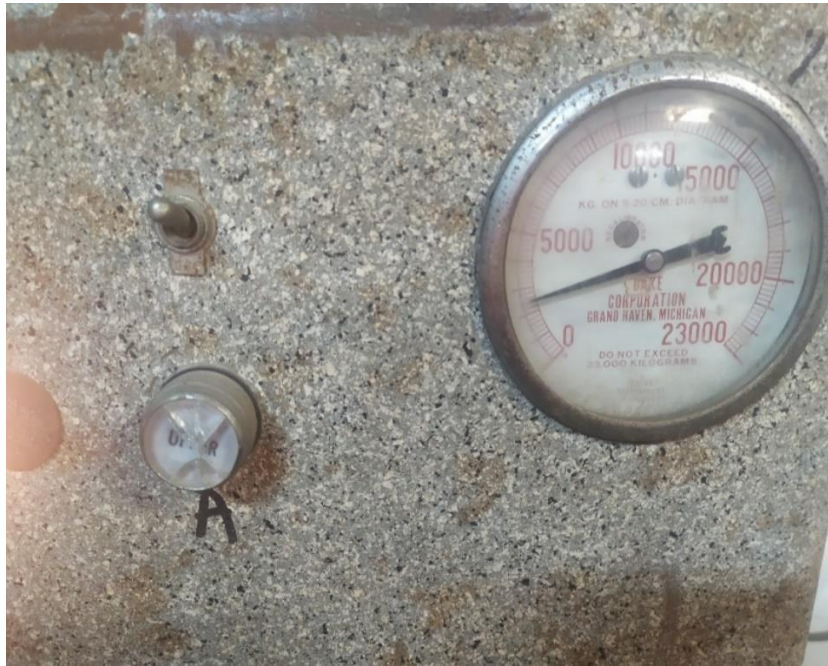
Στο επόμενο στάδιο οι πλάκες του PLA τοποθετήθηκαν στη θερμοπρέσσα στους 190°C, έτσι ώστε να τους δοθούν διάφορα πάχη για να εξεταστούν για την αντοχή τους στην κάμψη.



Εικόνα 24: Θερμοπρέσσα



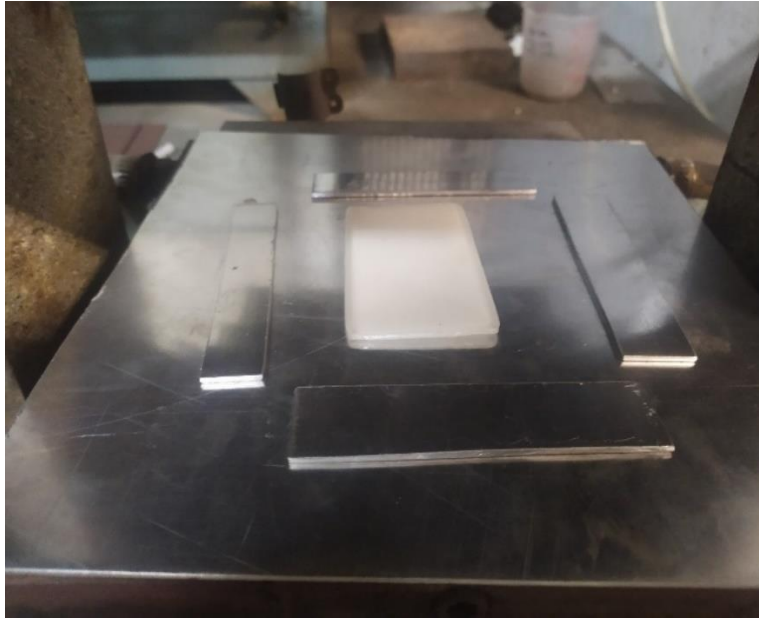
Εικόνα 25: Θερμοπρέσσα



Εικόνα 26: Ρυθμίσεις



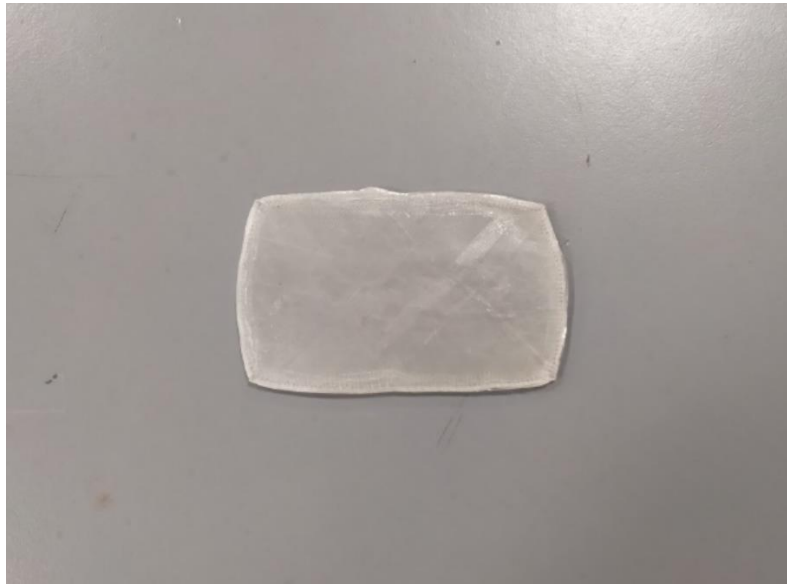
Εικόνα 27: Η πλάκα PLA στη θερμοπρέσσα



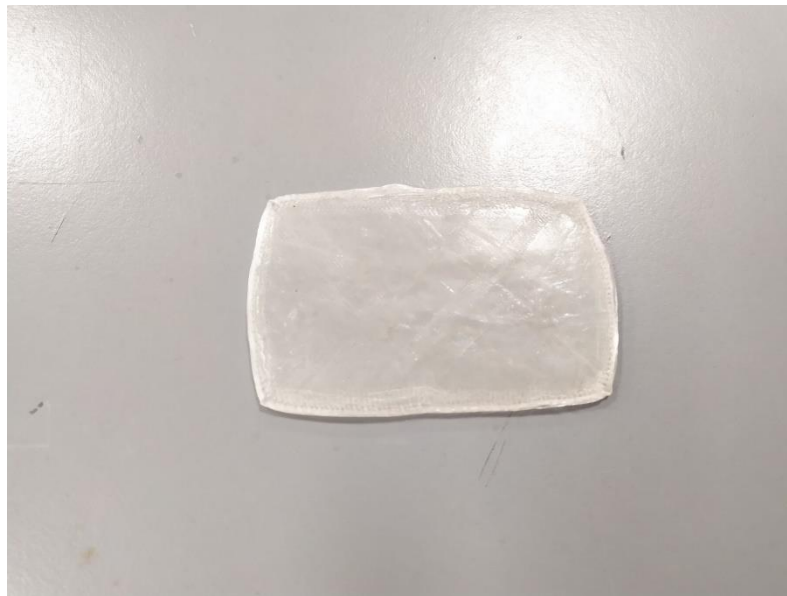
Εικόνα 28: Πλάκα μετά τη χρήση της θερμοπρέσσας



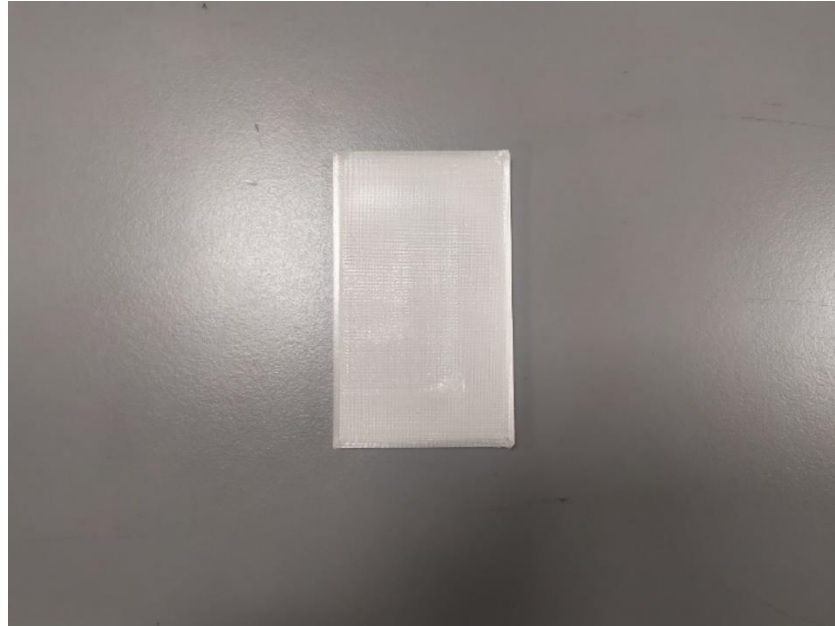
Εικόνα 29: Πλάκα 1.5mm



Εικόνα 30: Πλάκα 1.5mm



Εικόνα 31: Πλάκα 1.5mm



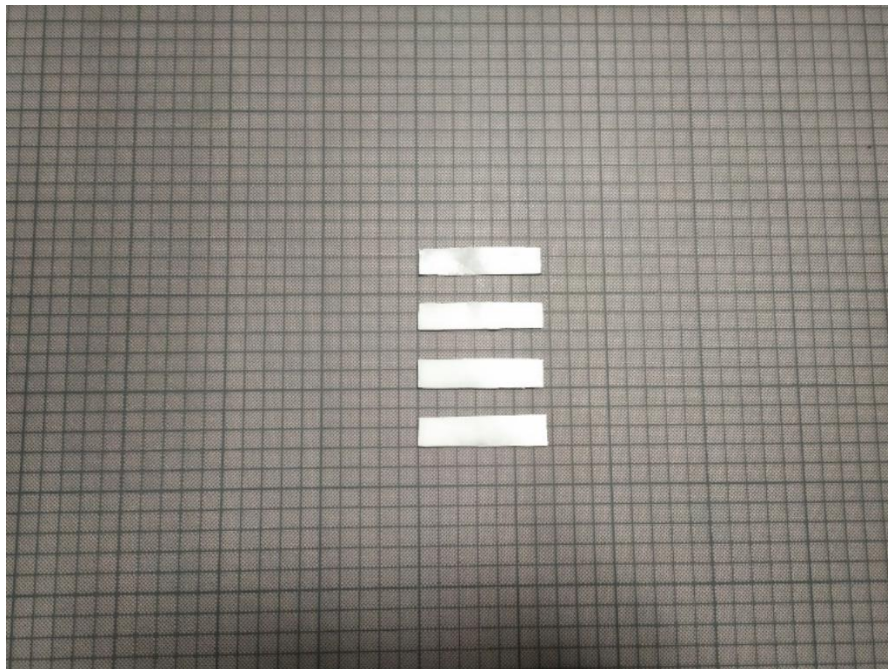
Εικόνα 32: Πλάκα 2mm



Εικόνα 33: Λαμάκια για την κόψη των δοκιμίων



Εικόνα 34: Δοκίμια 1.5mm πάχους



Εικόνα 35: Δοκίμια 2mm πάχους



Στο τελευταίο στάδιο των πειραμάτων τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στη συσκευή Imada MX2, για να δοκιμαστούν στην κάμψη τριών σημείων, σύμφωνα με το διεθνές πρότυπο ASTM D790-10, το οποίο αναλύθηκε πρωτύτερα. Η ταχύτητα με την οποία πραγματοποιήθηκε η κάμψη ήταν τα 10 mm/min και τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε θερμοκρασία δωματίου.

Ακολουθούν φωτογραφίες από την διάρκεια των πειραμάτων κάμψης και μετέπειτα εικόνες από τα δοκίμια, όπως αυτά ήταν μετά τις δοκιμές.



Εικόνα 36: Imada MX2 κατά το πείραμα



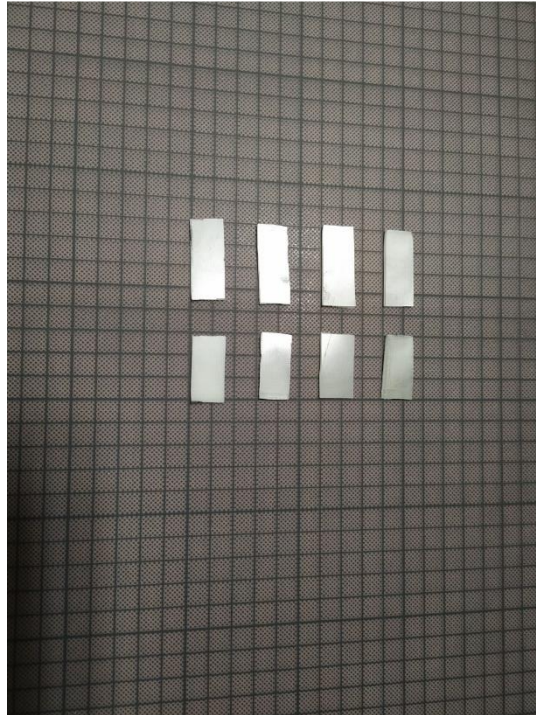
Εικόνα 37: Imada MX2 κατά το πείραμα



Εικόνα 38: Imada MX2 κατά το πείραμα



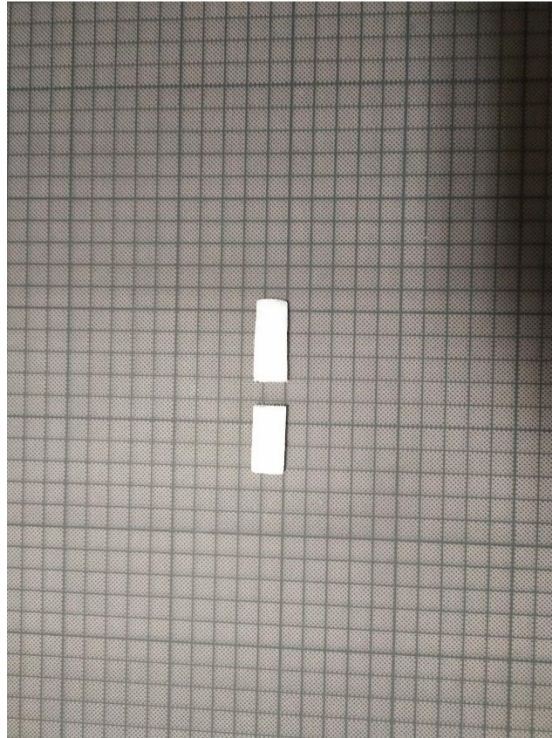
Εικόνα 39: Η συσκευή Imada MX2



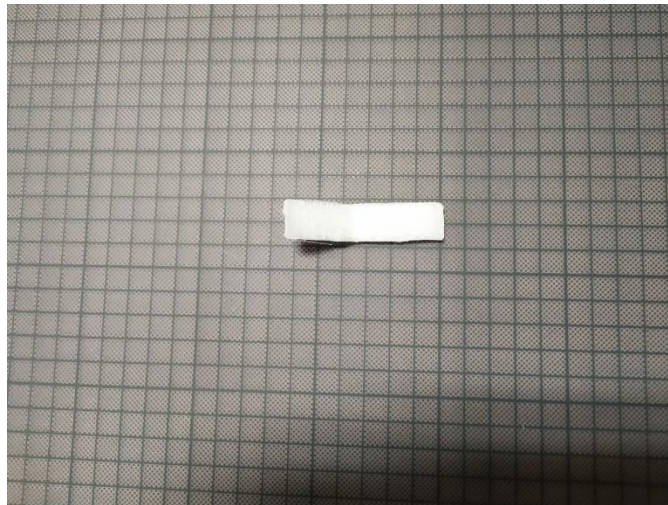
Εικόνα 40: Δοκιμασμένα δοκίμια



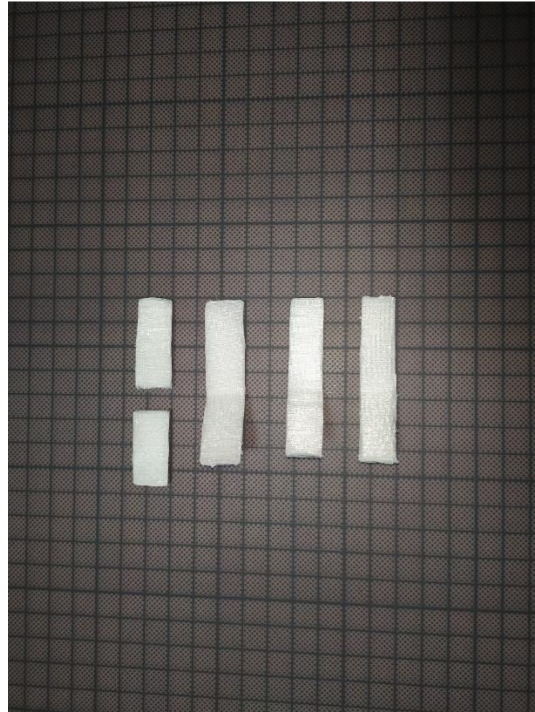
Εικόνα 41: Δοκιμασμένα δοκίμια



Εικόνα 42: Δοκιμασμένα δοκίμια



Εικόνα 43: Δοκιμασμένα δοκίμια



Εικόνα 44: Δοκιμασμένα δοκίμια



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9^ο: ΑΝΑΛΥΣΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την διεξαγωγή των πειραμάτων.

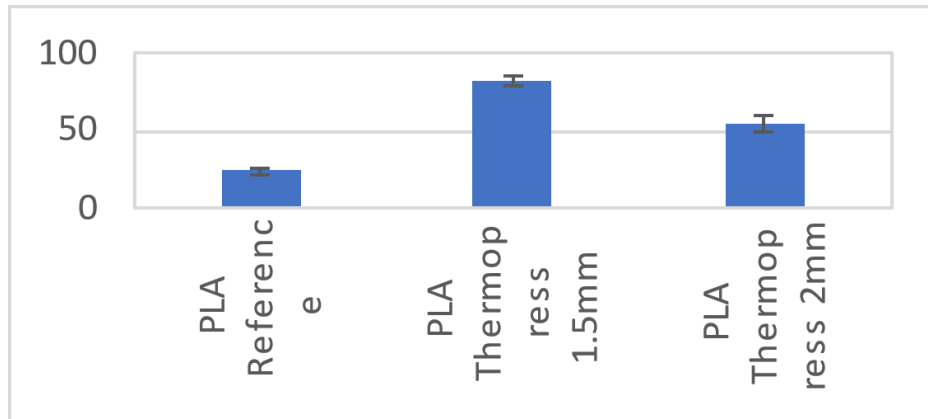
Παρατίθενται τα διαγράμματα και οι πίνακες με τις τιμές που προέκυψαν κατά τη διάρκεια των πειραμάτων.

Ακολούθησαν δοκιμές για τα δοκίμια του PLA, τα οποία ήταν τρία διαφορετικά. Χρησιμοποιήθηκαν δοκίμια από καθαρό PLA, ως σημείο αναφοράς για τα πειράματα και στη συνέχεια αυτά τα δείγματα πέρασαν από τη θερμοπρέσσα και δημιουργήθηκαν δύο δοκίμια νέα με 1.5mm και 2mm πάχος, αντίστοιχα.

Ακολουθεί ο πίνακας και το διάγραμμα που αφορά τη μέγιστη εφελκυστική αντοχή των δοκιμίων. Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα το δοκίμιο με το 1.5mm πάχος από την θερμοπρέσσα έχει τη μεγαλύτερη, ακόμα και σε σύγκριση και με το καθαρό υλικό.

<i>Ultimate Strength</i>			
<i>PLA Pure Thermopress</i>	<i>AVG [MPa]</i>	<i>STDEV [MPa]</i>	<i>Change</i>
PLA Reference	24,08	2,74	0,0%
PLA Thermopress 1.5mm	82,07	3,74	240,8%
PLA Thermopress 2mm	53,88	5,34	123,7%

Πίνακας 1: Μέγιστη εφελκυστική αντοχή



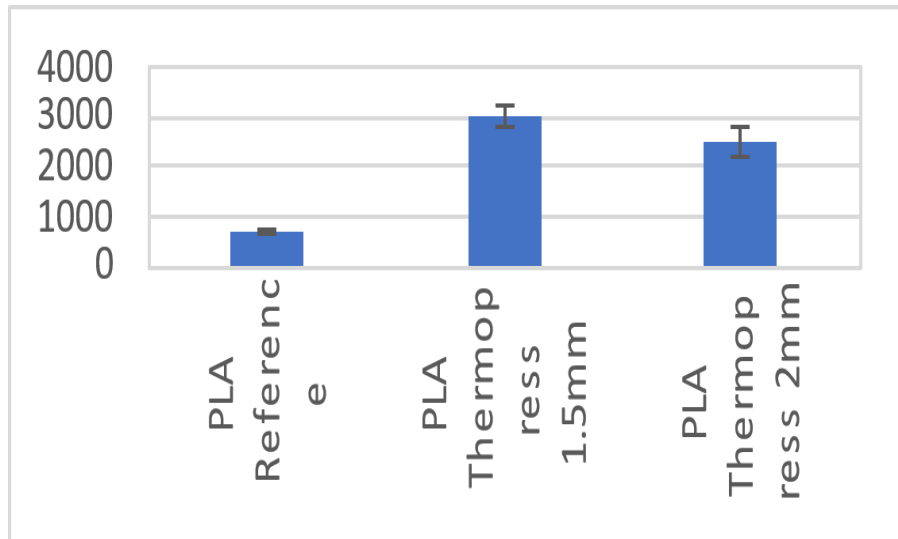
Διάγραμμα 1: Μέγιστη εφελκυστική αντοχή

Ακολουθούν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τον συντελεστή ελαστικότητας, που αποτελεί τη μονάδα μέτρηση της αντίστασης ενός αντικειμένου ή μιας ουσίας στην ελαστική παραμόρφωση, όταν ασκείται τάση σε αυτό.

Εδώ πάλι είναι φανερό πως τον μεγαλύτερο συντελεστή τον έχει το δεύτερο δοκίμιο με το 1.5mm πάχος.

<i>Elastic Modulus</i>			
<i>PLA Pure Thermopress</i>	<i>AVG [MPa]</i>	<i>STDEV [MPa]</i>	<i>Change</i>
PLA Reference	727,80	57,31	0,0%
PLA Thermopress 1.5mm	3015,25	240,88	314,3%
PLA Thermopress 2mm	2499,15	290,67	243,4%

Πίνακας 2: Συντελεστής ελαστικότητας

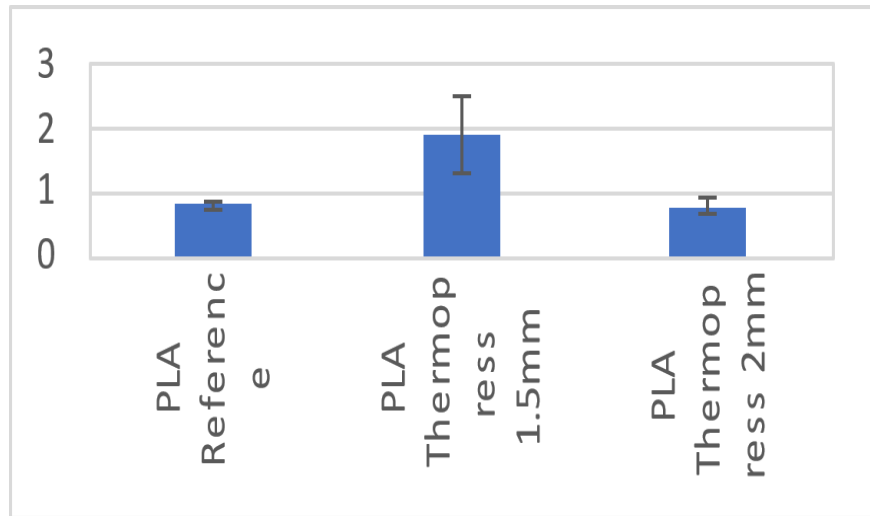


Διάγραμμα 2: Συντελεστής ελαστικότητας

Τέλος στον παρακάτω πίνακα και το διάγραμμα φαίνονται οι μετρήσεις της σκληρότητας του υλικού, καθώς η σκληρότητα είναι η ικανότητα ενός υλικού να απορροφά ενέργεια και να παραμορφώνεται πλαστικά χωρίς να σπάει. Επίσης το δείγμα με το 1.5mm πάχος είναι αυτό με τη μεγαλύτερη σκληρότητα.

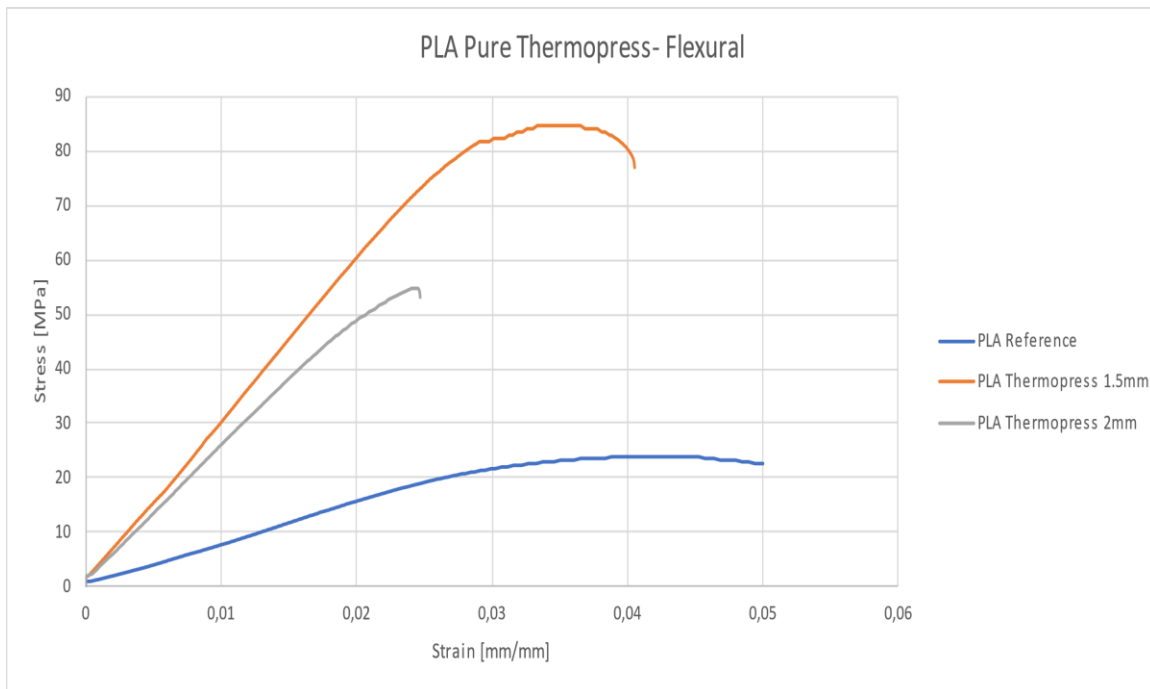
<i>Toughness</i>			
<i>PLA Pure Thermopress</i>	<i>AVG [MJ/m3]</i>	<i>STDEV [MJ/m3]</i>	<i>Change</i>
PLA Reference	0,81	0,08	0,0%
PLA Thermopress 1.5mm	1,90	0,59	134,0%
PLA Thermopress 2mm	0,78	0,13	-4,0%

Πίνακας 3: Μετρήσεις σκληρότητας υλικού



Διάγραμμα 3: Μετρήσεις σκληρότητας υλικού

Στο τελικό γράφημα φαίνεται πως το δοκίμιο με 2mm πάχος δεν έχει πολύ καλές ιδιότητες απέναντι στην κάμψη, όμως το δοκίμιο με το 1.5mm παρουσιάζει αρκετά ενθαρρυντικά αποτελέσματα που χρήζουν περαιτέρω έρευνας.



Διάγραμμα 4: Συνολικά αποτελέσματα



ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Δ. Λαβούτα, “Ενεργειακή Αξιοποίηση Απορριμμάτων Θερμοσκληρυμένων Πολυμερών Με Στέρεα Καύσιμα,” 2018.
- [2] “Basic Polymer Structure.” <https://www.e-education.psu.edu/matse81/node/2210>.
- [3] “Classification of Polymers.” https://www.toppr.com/guides/chemistry/polymers/classification-of-polymers/#2_Classification_Based_on_Structure_of_Polymers.
- [4] “Περί Πολυμερών.” https://ylikonet.gr/wp-content/uploads/2016/11/A1_Polimeri_Genika.pdf.
- [5] D. Evans and S. Watkins, “Polymers: from DNA to rubber ducks.” <https://www.science.org.au/curious/everything-else/polymers>.
- [6] “Μηχανικές Ιδιότητες Πολυμερών.” http://www.materials.uoi.gr/polymers/assets/lectures_pdfs/Texnologia_Part2.pdf.
- [7] “Biodegradable Polymers.” <https://www.toppr.com/guides/chemistry/polymers/biodegradable-polymers/>.
- [8] Π. Θεοδούλου, “Μελέτη Πολυμερισμού Στερεάς Κατάστασης Πολυγαλακτικού Οξέος,” 2012.
- [9] Α. Σερέτης, “Χημική Σύνθεση Γραμμικών Και Διακλαδισμένων Βιοαποικοδομήσιμων Πολυμερών Και Συμπολυμερών Του Πολυγαλακτικού Οξέος,” 2011. .
- [10] “The Advantages And Disadvantages Of PLA Plastic Filament For 3D Printing.” <https://www.openworldlearning.org/the-advantages-and-disadvantages-of-pla-plastic-filament-for-3d-printing/>.
- [11] “Eight advantages and Four disadvantages of the polylactic acid (PLA).” <https://www.linkedin.com/pulse/eight-advantages-four-disadvantages-polylactic-acid-pla-yewtree-zhang/>.
- [12] “The History of 3D Printing: 3D Printing Technologies from the 80s to Today.” <https://www.sculpteo.com/en/3d-learning-hub/basics-of-3d-printing/the-history-of-3d-printing/>.
- [13] Ι. Ζαχαράκης and Μ.-Π. Ζάβρα, “Τεχνολογίες Τρισδιάστατης Εκτύπωσης,” 2017.
- [14] “PLA 3D Printing: All You Need to Know.” <https://amfg.ai/2018/07/02/pla-3d-printing-all-you-need-to-know/>.
- [15] “Advantages of 3D Printing.” <https://www.hubs.com/knowledge-base/advantages-3d-printing/>.
- [16] “Heat Press.” https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_press.



- [17] “How To Choose A Laboratory Hot Press.” <https://kindle-tech.com/articles/how-to-choose-a-laboratory-hot-press>.
- [18] “Κάμψη.” <https://el.wikipedia.org/wiki/Κάμψη>.