



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ IV: ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ  
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

---

Εργασία Μαθήματος «Σχεδιασμός Προϊόντων»

---

ΦΙΛΙΚΑ ΠΡΟΣ ΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ  
ΠΟΤΗΡΙΑ ΚΑΦΕ ΜΙΑΣ ΧΡΗΣΗΣ

---

Συγγραφέας:  
Αριθμός Μητρώου:  
e-mail:

Βιδιάνος Γιαννίτσης  
ch19113  
vidianosgiannitsis@gmail.com

Αθήνα, 2022

# Περιεχόμενα

<b>1</b>	<b>Θεωρητικό Υπόβαθρο</b>	<b>2</b>
1.1	Το πρόβλημα και οι υπάρχουσες λύσεις . . . . .	2
1.2	Προδιαγραφές . . . . .	2
1.2.1	Περιβάλλον . . . . .	2
1.2.2	Οικονομία . . . . .	3
1.3	Ιδέες . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Υλικά και Μεθόδοι</b>	<b>4</b>
2.1	Χάρτινο ποτήρι με επικάλυψη από PLA . . . . .	4
2.2	Χάρτινο ποτήρι με επικάλυψη από PBS . . . . .	5
2.3	Πλαστικό ποτήρι από PLA και PBS . . . . .	5
2.4	Πλαστικό ποτήρι από πολυυδροξυαλκανοϊκό πολυμερές . . . . .	5
2.5	Τεχνοοικονομική Ανάλυση . . . . .	6
2.6	Περιβαλλοντική Ανάλυση . . . . .	6
2.6.1	Ανάλυση Κύκλου Ζωής . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Αποτελέσματα</b>	<b>7</b>
3.1	Ιδιότητες του προϊόντος . . . . .	7
3.2	Περιβαλλοντική Επίδραση . . . . .	7
3.2.1	Ανάλυση Κύκλου Ζωής . . . . .	8
3.2.2	Σενάρια Τέλους Ζωής . . . . .	9
3.3	Οικονομική Ανάλυση . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Συμπεράσματα &amp; Προτάσεις</b>	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>11</b>

## Περίληψη

Σκοπός της μελέτης αυτής είναι η διερεύνηση διάφορων επιλογών για ποτήρια καφέ μίας χρήσης. Με τα αυξανόμενης σοβαρότητας μέτρα κατά των πλαστικών στη συσκευασία για την προστασία του περιβάλλοντος, είναι όλο και πιο απαραίτητο να βρεθούν βιώσιμες λύσεις οι οποίες είναι πραγματικά φιλικές προς το περιβάλλον αλλά είναι και οικονομικές. Αρχικά γίνεται μία αναδρομή όλων των τεχνολογιών που έχουν υιοθετηθεί τα τελευταία χρόνια για την αντικατάσταση των πλαστικών όπως το αδιαβροχοποιημένο χαρτί και η επικάλυψη από LDPE και συζητάται γιατί αυτές οι λύσεις δεν είναι ιδανικές. Έτσι, παρακάτω αναπτύσσονται περισσότερο τα βασικότερα βιοπολυμερή που έχουν εφαρμογή στην συσκευασία (PLA, PBS, PHB) και πως αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ποτήρια καφέ. Γίνεται μία ανάλυση των ιδιοτήτων των υλικών αυτών και τι πρόσθετα ή μίγματα τους μπορούν να δημιουργηθούν για να βελτιστοποιηθεί η σύνθεση τους. Επίσης όμως γίνεται και μία περιβαλλοντική ανάλυση της επίδρασης που έχει κάθε προϊόν στο περιβάλλον και στον άνθρωπο κατά την παραγωγή, χρήση και απόρριψη του και γίνεται και μία οικονομική ανάλυση του κόστους κάθε τεχνολογίας. Με αυτά τα εργαλεία, μπορεί να υπάρξει ένα συμπέρασμα για την καταλληλότητα της κάθε τεχνολογίας αυτή την στιγμή καθώς και στο μέλλον όπου τα υλικά αυτά θα μελετηθούν με περισσότερη λεπτομέρεια. Η ανάλυση αυτή επικεντρώθηκε σε 2 υλικά για επικάλυψη χάρτινων ποτηριών (PLA, PBS) αλλά και σε 2 καθαρά πλαστικά ποτήρια, ένα από μίγμα PLA-PBS (για το οποίο εξετάστηκαν διαφορετικές συστάσεις και διαφορετικά πρόσθετα) και ένα από PHBV. Συμπέρασμα είναι πως η πιο εύκολο να υιοθετηθεί τεχνολογία είναι η χρήση βιοπολυμερών για επικάλυψη χαρτιού ενώ η τεχνολογία που πρέπει να διερευνηθεί παραπάνω και αποτελεί μελλοντικό στόχο είναι η παραγωγή πλαστικών ποτηριών από βιοαποδομήσιμα πολυμερή με ιδιότητες παρόμοιες αυτές των παραδοσιακών πλαστικών ποτηριών.

# 1 Θεωρητικό Υπόβαθρο

## 1.1 Το πρόβλημα και οι υπάρχουσες λύσεις

Μετά από ριζικές αλλαγές στο νομοθετικό πλαίσιο για την χρήση πλαστικών στην παραγωγή ποτηριών μίας χρήσης, αποφασίστηκε πως δεν είναι πλέον αποδεκτή η χρήση αυτών των υλικών λόγω μόλυνσης του περιβάλλοντος. Μετά τις αλλαγές αυτές, προτεραιότητα των παραγωγών ήταν προϊόντα που δεν μολύνουν το περιβάλλον όπως τα πλαστικά αλλά δεν είναι ούτε ακριβότερα αυτών. Η πιο εύκολη επιλογή για κάτι τέτοιο ήταν τα χάρτινα ποτηράκια τα οποία μετά από κάποια διεργασία (πχ αδιαβραχοποίηση) πετύχαιναν το επιθυμητό αποτέλεσμα [1]. Όμως, τα χάρτινα ποτηράκια που υπάρχουν αυτή τη στιγμή χαρακτηρίζονται γενικότερα αρκετά υποδιέστερα των πλαστικών. Μία άλλη ιδέα που προτάθηκε είναι αντί να καταργηθεί πλήρως το πλαστικό, να προστεθεί ένα μικρό στρώμα (μερικών  $\mu\text{m}$ ) πλαστικού (πχ πολυαιθυλενίου) το οποίο θα προσφέρει τις επιθυμητές ιδιότητες στο ποτήρι και θα μειώσει δραστικά την περιβαλλοντική του επίδραση [2, 3]. Βέβαια, ακόμη και αυτή η μικρή ποσότητα μπορεί να δημιουργήσει περιβαλλοντικά προβλήματα και άρα δεν είναι προτιμητέα.

Έτσι, η επιστημονική κοινότητα έχει επικεντρωθεί στη χρήση βιοπολυμερών για την παραγωγή ποτηριών καφέ τα οποία είναι φιλικά προς το περιβάλλον καθώς είναι βιοδιασπώμενα, κάνοντας έτσι εύκολη την ανακύκλωσή τους. Παρακάτω ακολουθεί μία τεχνοοικονομική και περιβαλλοντική ανάλυση διάφορων επιλογών βασισμένων στα βιοπολυμερή για την χρήση σε ποτήρια καφέ.

Γιατί όμως μας ενδιαφέρουν καν τα ποτήρια μίας χρήσης; Κάποιος θα μπορούσε να πει πως θα μπορούσαν να καταργηθούν και να χρησιμοποιηθούν μόνο επαναχρησιμοποιούμενα ποτήρια, αλλά η απάντηση σε αυτό είναι πως τα ποτήρια μίας χρήσης έχουν γίνει μέρος της ζωής μας καθώς είναι απλώς πολύ πιο πρακτικά [4]. Για αυτό η εργασία αυτή έχει επικεντρωθεί σε φιλικά προς το περιβάλλον ποτήρια μίας χρήσης.

## 1.2 Προδιαγραφές

Για να πετύχει ένα νέο προϊόν σε έναν τομέα, πρέπει οι ιδιότητες του να είναι παρόμοιες (ιδανικά και καλύτερες) από προϊόντα που ήδη χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία αυτή. Υλικά που είχαν ευρεία εφαρμογή στον τομέα των ποτηριών μίας χρήσης πριν την κατάργηση των πλαστικών είναι το πολυστυρένιο (PS) και το πολυπροπυλένιο (PP). Για αυτό, πολλοί μελετητές έχουν συγκρίνει τις ιδιότητες του παραγόμενου υλικού με αυτές τέτοιων υλικών [5, 6]. Όμως, ορισμένες τεχνολογίες βασίζονται και στο χαρτί και την επικάλυψη του με κάποιο πολυμερές. Γνωστό στην αγορά αυτή είναι το πολυαιθυλένιο χαμηλής πυκνότητας (LDPE) για αυτό στην περίπτωση εκείνη αυτό είναι το benchmark μίας έρευνας [7]. Κατά την σύγκριση αυτή, πρέπει το υλικό να προσφέρει αντοχή σε υγρά, να έχει πολύ καλές θερμικές ιδιότητες και να έχει και σχετικά καλές μηχανικές ιδιότητες για να θεωρηθεί κατάλληλο για κάποια τέτοια εφαρμογή.

Όμως, για να θεωρηθεί ποιοτικό το προϊόν, δεν αρκεί μόνο αυτό. Πρέπει να είναι και ένα πιο βιώσιμο προϊόν από το προηγούμενο. Βασικό ρόλο εδώ παίζει ο περιβαλλοντικός παράγοντας.

### 1.2.1 Περιβάλλον

Ο λόγος που γίνεται μία τέτοια μελέτη είναι πρακτικά το περιβάλλον. Αν αγνοήσουμε αυτό, τα σύννητα πλαστικά ποτήρια είναι αποδεχτά από κάθε άλλη άποψη. Για αυτό πρέπει οποιαδήποτε νέα πρόταση να είναι σίγουρα φιλική προς το περιβάλλον.

Αυτό έχει δύο βασικές πτυχές. Αρχικά πρέπει να επιλεγεί ένα υλικό που δεν προκαλεί περιβαλλοντικά προβλήματα κατά τη σύνθεσή του. Δηλαδή πρέπει και οι πρώτες ύλες και οι

διεργασίες που χρησιμοποιούνται να είναι "φιλικές" προς το περιβάλλον. Ακόμη καλύτερο θα είναι αν το προϊόν συντίθενται από ανακυκλωμένα απόβλητα, παίζοντας έτσι σημαντικότερο ρόλο σε ένα μοντέλο κυκλικής οικονομίας και βιώσιμης ανάπτυξης.

Επίσης όμως πρέπει και το τελικό προϊόν να μην είναι επικύνδυνο για το περιβάλλον. Για παράδειγμα, προϊόντα όπως το πολυαιθυλένιο, μπορούν να ανακυκλωθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν [8] ή ακόμη και να παραχθούν από βιομάζα (γνωστό και ως bio-PE). Όμως, παραμένει ένα υλικό το οποίο αν δεν διαχειριστούμε σωστά, είναι επικύνδυνο προς το περιβάλλον. Αντίθετα, η επιλογή ενός βιοδιασπώμενου προϊόντος κάνει το υλικό πολύ λιγότερο πιθανό να δημιουργήσει περιβαλλοντικά προβλήματα.

### 1.2.2 Οικονομία

Η αγορά των ποτηριών καφέ και γενικότερα των ποτηριών μίας χρήσης είναι μία πάρα πολύ μεγάλη αγορά. Όσο μεγαλύτερη είναι η αγορά, τόσο πιο δύσκολο είναι να γίνουν ριζικές αλλαγές σε αυτή. Για αυτόν τον λόγο, είναι απαραίτητο όποια επιλογή επιλεχθεί να μπορεί να αξιολογηθεί και οικονομικά καθώς μία ακριβή λύση, ακόμη και αν είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον δεν θα είναι αποδεκτή από το κοινό. Αυτός είναι μάλλον και το μεγαλύτερο εμπόδιο στην χρήση βιοπολυμερών, καθώς αυτά είναι ακριβότερα από τα συμβατικά πολυμερή, αλλά μπορούν να εξεταστούν και μέθοδοι για την μείωση του κόστους αυτού.

### 1.3 Ιδέες

Για να δημιουργηθεί μία αρχική εικόνα των επιλογών που υπάρχουν, είναι απαραίτητο να γίνει ένας καταγιγισμός ιδεών με βάση την βιβλιογραφία. Θα σχολιαστεί γενικά και συνοπτικά η κάθε ιδέα, αλλά χωρίς πολύ λεπτομέρεια, με σκοπό να απορριφθούν κάποιες ιδέες και να αναλυθεί ένας μικρότερος αριθμός πιο λεπτομερώς. Όπως προαναφέρθηκε, μία κλασσική τεχνική είναι η χρήση αδιαβροχοποιημένου χαρτιού [1]. Αυτή είναι μία φθηνή τεχνική και το προϊόν είναι φιλικό προς το περιβάλλον καθώς είναι χαρτί. Όμως, έχει δύο βασικά προβλήματα. Αρχικά, η ποιότητα του χάρτινου αυτού ποτηριού είναι αρκετά υποδιέστηρη του πλαστικού και παρόλο που έχει αποκτήσει μία αντοχή στο υγρό, αυτή είναι για ένα μικρό χρονικό διάστημα. Επίσης, σε τέτοιες διεργασίες χρησιμοποιούνται συχνά φθοριούχες ενώσεις οι οποίες μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα υγείας στον άνθρωπο [2, 9]. Για αυτό, δεν μελετήθηκε παραπάνω.

Τα χάρτινα ποτήρια με επικάλυψη από LDPE είναι αυτή την στιγμή αρκετά διαδεδομένα [2, 3]. Είναι μία εύκολη και φθηνή τεχνολογία η οποία προσφέρει στο υλικό όλες τις απαιτούμενες ιδιότητες. Έχει όμως αρκετά προβλήματα για τον άνθρωπο και το περιβάλλον. Αρχικά, το LDPE παράγεται μαζικά από πετρελαιοκίνητες πηγές. Μπορεί να παραχθεί και από βιομάζα και να έχει τις ίδιες ιδιότητες βέβαια, άρα αυτό δεν μπορεί να θεωρηθεί το μεγαλύτερο εμπόδιο. Αυτό είναι σίγουρα ο διαχωρισμός του χαρτιού από το πολυμερές και η διαχείριση των δύο ξεχωριστά. Αυτή είναι μία διεργασία με υψηλό κόστος και ακόμη μετά από αυτήν πρέπει να διαχειριστεί κανείς και το πολυμερές ξεχωριστά. Επίσης, μία πρόσφατη έρευνα έδειξε πως τέτοια ποτήρια απελευθερώνουν νανοσωματίδια μέσα στο ρόφημα τα οποία μετά καταναλώνονται από ανθρώπους [3]. Άρα, σίγουρα δεν είναι μία ιδανική λύση. Αρκετά από τα προβλήματα αυτά λύνονται με την χρήση ενός βιοπολυμερούς όπως το πολυγαλακτικό οξύ (PLA) ή το ηλεκτρικό πολυβουτυλένιο (PBS). Παράγονται από ανανεώσιμες πρώτες ύλες, έχουν τις επιθυμητές ιδιότητες και είναι βιοδιασπώμενα. Θεωρείται πως πολυμερή σαν το PLA μπορούν να αποδομηθούν μαζί με το χαρτί (με πιο αργό ρυθμό από ότι το ίδιο το χαρτί βέβαια) σε ένα πιθανό σενάριο τέλους ζωής τους [7] κάτι που θα βοηθούσε αρκετά στην υιοθέτησή τους. Αλλά ακόμη και να διαχωριστούν τα δύο υλικά, η μετέπειτα τους διαχείριση δεν θα είναι τόσο δύσκολη. Βέβαια, το τελευταίο από τα παραπάνω προβλήματα σε σχέση με την απελευθέρωση νανοσωματιδίων πλαστικού μέσα στο ρόφημα είναι πολύ πιθανό να

συνεχίσει να υπάρχει. Παρ'όλα αυτά είναι μία τεχνολογία η οποία μελετάται ευρέως και είναι πιθανόν να υιοθετηθεί μαζικά [2, 7, 9].

Τέλος, λόγω των προβλημάτων που έχει η παραπάνω τεχνολογία και λόγω της μεγάλης επιτυχίας των πλαστικών ποτηριών, εξετάζεται ευρέως και η χρήση βιοπολυμερών για την παραγωγή ποτηριών μίας χρήσης με παρόμοιες ιδιότητες με τα παραδοσιακά πλαστικά ποτήρια [5, 10]. Αυτό έχει αρκετά πλεονεκτήματα, όπως ότι το τελικό προϊόν μπορεί να έχει εύκολα πολύ παρόμοιες ιδιότητες με τα παραδοσιακά πλαστικά ποτήρια, αλλά είναι βιοδιασπώμενο υλικό και ανακυκλώνεται εύκολα. Έχουν δοκιμαστεί πάρα πολλά υλικά για αυτό, αλλά ένα από τα κύρια είναι το μίγμα PLA-PBS. Το PBS είναι ένα βιοδιασπώμενο πολυμερές με πολύ καλές θερμικές ιδιότητες και κάποιες καλές μηχανικές ιδιότητες όπως η αντοχή του σε κρούση αλλά πρόβλημα σε άλλες (πχ διάτμηση). Το μίγμα του με PLA δίνει ένα εξαιρετικό υλικό το οποίο είναι εύπλαστο και έχει πολύ καλές μηχανικές αντοχές. Βέβαια, λόγω του χαμηλού σημείου τήξεως του PBS, το προϊόν έχει χαμηλότερο σημείο τήξεως, αλλά είναι πίο θερμικά σταθερό. Αν το δούμε αντίθετα το PLA είναι ένα υλικό με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες και η προσθήκη του PBS σε αυτό το κάνει πίο θερμικά σταθερό. Η μείωση του σημείου τήξεως μπορεί να διορθωθεί προσθέτοντας κάποιο ορυκτό πρόσθετο όπως το talc. Πέρα από την καλύτερη θερμική σταθερότητα, προσφέρει στο μίγμα και μεγαλύτερη κρυσταλλικότητα καθώς υποβοηθά την πυρήνωση των κρυστάλλων και αυξάνει τις μηχανικές του ιδιότητες [5, 10]. Ένα ακόμη υλικό το οποίο είναι πιθανόν να είναι αρκετά ενδιαφέρον σε τέτοιες εφαρμογές είναι το πολυ-(υδρόξυ βουτηρικό) (PHB). Είναι ένα ημικρυσταλλικό βιοδιασπώμενο πολυμερές με πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες το οποίο μπορεί να διασπαστεί πολύ εύκολα σε ποικίλα περιβάλλοντα και όχι μόνο σε βιομηχανικές συνθήκες όπως πχ το PLA. Για αυτό είναι ίσως η πίο φιλική προς το περιβάλλον λύση. Βέβαια έχει ορισμένα προβλήματα όπως ένα πολύ μικρό εύρος επεξεργασίας (ξεκινάει να αποσυντίθεται 5-10 βαθμούς κελσίου πάνω από το σημείο τήξης του), υψηλή ψαθιρότητα και πολύ ακριβή τιμή [11]. Υπάρχουν διάφορες τεχνικές για να διορθωθούν τα προβλήματα του όπως η δημιουργία συμπολυμερών του με άλλα υλικά όπως το υδροξυβαλερικό (HV). Αυτό θα αναλυθεί περισσότερο παρακάτω.

## 2 Υλικά και Μεθόδοι

Στην ενότητα αυτή θα δωθούν με περισσότερη λεπτομέρεια δεδομένα για την κάθε τεχνολογία που εξετάζεται. Πάνω στα δεδομένα αυτά θα βασιστεί και η ανάλυση της κάθε τεχνολογίας που θα ακολουθήσει και η τελική επιλογή του ιδανικού προϊόντος με βάση μία τεχνοοικονομική και περιβαλλοντική ανάλυση του κάθε προϊόντος. Οι 4 επιλογές που επιλέχθηκαν για περαιτέρω ανάλυση είναι οι εξής:

- Χάρτινο ποτήρι με επικάλυψη από PLA
- Χάρτινο ποτήρι με επικάλυψη από PBS
- Ποτήρι από μίγμα PLA-PBS
- Ποτήρι από πολυ-υδροξυβουτηρικό-βαλερικό (PHBV)

### 2.1 Χάρτινο ποτήρι με επικάλυψη από PLA

Το PLA είναι ένα από τα πιο καλά μελετημένα βιοπολυμερή. Έχει καλές μηχανικές ιδιότητες, συγκρίσιμες μάλιστα του πολυαιθυλενίου. Η επικάλυψη του σε χαρτί πρέπει να είναι της τάξης των μερικών μικρομέτρων τουλάχιστον και μπορεί να παραχθεί με εκβολή του πολυμερούς πάνω στο χαρτί. Ακόμη, αν η διεργασία της εκβολής βελτιστοποιηθεί με κάποια τεχνική, όπως πχ κάποιο παραγοντικό πείραμα, μπορεί να προκύψει ένα ποτήρι με πολύ μικρή ποσότητα

PLA το οποίο όμως έχει όλες τις επιθυμητές ιδιότητες [7] . Βασικό χαρακτηριστικό που μας ενδιαφέρει για το υλικό αυτό είναι το βάρος της επικάλυψης το οποίο δίνεται τυπικά ανά μονάδα επιφάνειας χαρτιού. Για ένα κλασσικό ποτήρι με επικάλυψη από LDPE αυτό είναι περίπου  $17.7 \text{ g/m}^2$  το οποίο για PLA θα αντιστοιχούσε σε  $23.6 \text{ g/m}^2$ . Η βελτιστοποίηση των συνθηκών του εκβολέα (θερμοκρασία  $250^\circ\text{C}$  και κοχλίας χαμηλών τάσεων θεωρούνται αυτά που παίζουν τον βασικό ρόλο) επέτρεψε την παραγωγή ενός ποτηριού με βάρος  $10.6 \text{ g/m}^2$  [7] . Αυτό το υλικό είναι μία καλή επιλογή η οποία έχει αρχίσει να διερευνάται αρκετά [2, 7, 12].

## 2.2 Χάρτινο ποτήρι με επικάλυψη από PBS

Το PBS είναι ένα άλλο βιοπολυμερές το οποίο έχει μελετηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία. Έχει πολύ καλές θερμικές ιδιότητες, καλύτερες μάλιστα από το PLA. Έχει μέτριες μηχανικές ιδιότητες, αλλά αυτό είναι λιγότερο σημαντικό σε μία τέτοια εφαρμογή [5]. Λόγω των θερμικών ιδιοτήτων αυτών κυρίως αξίζει να μελετηθεί ως εναλλακτική. Η δημιουργία του στρώματος γίνεται παρόμοια με το PLA αλλά σε χαμηλότερη θερμοκρασία καθώς το PBS έχει χαμηλότερο σημείο τήξης [9] . Δεν υπάρχουν τόσο λεπτομερές αναλύσεις για το υλικό αυτό όσο το PLA, αλλά σύμφωνα με την βιβλιογραφία είναι σίγουρα ένα πολύ χρήσιμο υλικό το οποίο αξίζει να μελετηθεί. Επίσης, το στρώμα που απαιτείται στην περίπτωση του είναι της τάξης των  $5.5 \text{ g/m}^2$  το οποίο είναι μία βελτίωση από το PLA. Για αυτό αξίζει να αξιολογηθούν περαιτέρω και τα δύο υλικά.

## 2.3 Πλαστικό ποτήρι από PLA και PBS

Η επιλογή του μίγματος αυτών των δύο πολυμερών είναι μία ακόμη αρκετά καλή επιλογή για την εφαρμογή αυτή. Όπως προαναφέρθηκε είναι ένα πολύ καλό μίγμα καθώς τα δύο πολυμερή "συμπληρώνουν" το ένα το άλλο από άποψη ιδιοτήτων [5] . Επίσης το προϊόν που παράγεται είναι ένα μίγμα βιοδιασπώμενων πολυμερών άρα η διαχείριση και απόρριψη του είναι αρκετά εύκολη. Αυτό το μίγμα είναι αρκετά διερευνημένο στη βιβλιογραφία και υπάρχουν διάφορες συστάσεις των δύο που έχουν δοκιμαστεί. Για παράδειγμα, έχει σημειωθεί πως αν το PBS είναι πάνω από 50 %, η προσθήκη PLA σε αυτό δρα ως ένα αρκετά καλό ενισχυτικό πρόσθετο [5], ενώ αν το PLA είναι περισσότερο, το υλικό έχει βασικά τις ιδιότητες αυτού και καλύτερη θερμική σταθερότητα λόγω της φάσης του PBS [10] . Επίσης, έχει σημειωθεί ότι ανόργανο πρόσθετα όπως το talc μπορούν να αυξήσουν την θερμική σταθερότητα και τις μηχανικές ιδιότητες του προϊόντος αλλά και να μειώσουν το κόστος του [5, 10]. Επίσης έχει μελετηθεί η χρήση συμπολυμερών του PBS όπως η χρήση ενός μίγματος ηλεκτρικού και αδιπικού οξέος κατά τον πολυμερισμό το οποίο βελτιώνει την ευκαμψία και την ανθεκτικότητα του υλικού [10] . Συστάσεις που έχουν δοκιμαστεί στην βιβλιογραφία είναι 69-31 ή 20-80 (PBS-PLA) [5, 10].

## 2.4 Πλαστικό ποτήρι από πολυυδροξυαλκανοϊκό πολυμερές

Η ομάδα των πολυυδροξυαλκανοϊκών πολυμερών και ιδιαίτερα το PHB και το συμπολυμερές του με το HV (PHBV) είναι μία παρα πολύ ενδιαφέρουσα κατηγορία υλικών καθώς είναι από τα πιο φιλικά προς το περιβάλλον πολυμερή καθώς μπορούν να αποδομηθούν από διάφορα βακτήρια σε ένα εύρος συνθηκών και όχι μόνο σε βιομηχανικές συνθήκες [11]. Το PHB είναι ένα ενδιαφέρον υλικό το οποίο όμως έχει αρκετά προβλήματα όπως προαναφέρθηκε. Η προσθήκη του HV σε αυτό, λύνει πολλά από αυτά με αποτέλεσμα ένα ημικρυσταλλικό υλικό με αρκετά καλές θερμομηχανικές ιδιότητες [13, 14]. Είναι ένα ακριβό στην παραγωγή του πολυμερές για αυτό έχει αρχίσει να μελετάται αρκετά η παραγωγή του από βιοαπόβλητα, τα οποία είναι πολύ φθηνές πρώτες ύλες ως ένα βασικό προϊόν ενός βιοδιυλιστηρίου [15, 16].

Ακόμη, για την περαιτέρω μείωση της τιμής του αλλά και βελτίωση των ιδιοτήτων του εξετάζεται η χρήση φθηνών πρόσθετων σε αυτό. Έτσι βελτιώνονται και οι θερμομηχανικές του ιδιότητες αλλά μειώνεται και η τιμή του. Ένα από τα καλύτερα πρόσθετα σε αυτό είναι οι ίνες από λινάρι [6, 17]. Μία καλή σύσταση που έχει εξεταστεί στη βιβλιογραφία και δίνει στο υλικό τις επιθυμητές ιδιότητες (παρόμοιες ή και καλύτερες του πολυστυρενίου) είναι η σύσταση 67/3/30 σε PHB/HV/Λινάρι [17]. Στην βιβλιογραφία δεν βρέθηκε κάποια πηγή που να μιλάει συγκεκριμένα για την εφαρμογή του PHBV σε ποτήρια καφέ, αλλά λόγω των αρκετά επιθυμητών ιδιοτήτων του (συγκρίσιμες του PS) θεωρείται πως μπορεί να εφαρμοστεί σε μεγάλο βαθμό σε αυτόν τον τομέα. Ακόμη, αν διευρύνουμε τον τομέα γενικότερα στη συσκευασία έχουν υπάρξει πηγές που μελέτησαν τέτοια υλικά [11, 14].

## 2.5 Τεχνοοικονομική Ανάλυση

Η τεχνοοικονομική ανάλυση που θα ακολουθήσει θα γίνει με βάση πληροφορίες της βιβλιογραφίας με σκοπό να διερευνηθεί πió υλικό είναι φθηνότερο χωρίς να είναι ποιοτικά υποδιέστερο. Αξίζει να αναφερθεί πως το PLA είναι το πió διαδεδομένο βιοπολυμερές πάνω στο οποίο γίνεται αρκετή έρευνα άρα είναι λογικό να είναι το φθηνότερο εκ των επιλογών με υπόθεση πως θα γίνει commodity στα επόμενα χρόνια όσο υιοθετούνται όλο και περισσότερα τα βιοπλαστικά [2]. Αντίθετα, το PHBV και γενικά τα PHAs είναι μία κατηγορία πολυμερών τα οποία είναι αρκετά καινούργια σαν τεχνολογία και για αυτό είναι και αρκετά ακριβά σε σχέση με άλλες επιλογές. Όμως, καθώς βελτιστοποιείται η παραγωγή τους, θεωρείται πως μπορούν να γίνουν μία καλή επιλογή [11]. Περισσότερες λεπτομέρειες για την τεχνοοικονομική ανάλυση θα αναφερθούν κατά την ανάλυση των αποτελεσμάτων.

## 2.6 Περιβαλλοντική Ανάλυση

Η περιβαλλοντική ανάλυση και σύγκριση των πολυμερών αυτών θα γίνει με αρκετά βήματα. Αρχικά πρέπει να αξιολογηθεί ποίό υλικό είναι πió φιλικό προς το περιβάλλον κατά την δημιουργία του και έπειτα πió είναι πιο εύκολο να διαχειριστούμε κατά την απόρριψη του. Μέσα στα σενάρια τέλους ζωής του υλικού θα μπει και ο οικονομικός παράγοντας καθώς δεν έχει σημασία μόνο πόσο εύκολη είναι η διαχείριση αλλά και πόσο φθηνή. Για την αξιολόγηση κάποιον από αυτών των κριτηρίων έγινε και μία ανάλυση κύκλου ζωής (LCA) με το λογισμικό SimaPRO και τη βάση δεδομένων EcoInvent, με μέθοδο εκτίμησης των επιπτώσεων την Impact 2002+.

### 2.6.1 Ανάλυση Κύκλου Ζωής

Στα πλαίσια της περιβαλλοντικής ανάλυσης της κάθε επιλογής έγινε και μία ανάλυση κύκλου ζωής του κάθε προϊόντος. Λόγω έλλειψης σημαντικών πληροφοριών από την βάση δεδομένων για την ανακύκλωση ή κομποστοποίηση βιοπολυμερών, η ανάλυση αυτή περιορίστηκε στην σύνθεση του προϊόντος και όχι σε όλο τον κύκλο ζωής του. Επίσης, καθώς η βάση δεδομένων δεν περιέχει καμία πληροφορία για βακτηριδιακή σύνθεση (στην οποία βασίζονται τα PHAs) δεν μελετήθηκε σε αυτήν η τελευταία επιλογή της χρήσης του PHBV. Βέβαια, παρόλο που είναι ελλιπής σαν ανάλυση, είναι ενδιαφέρον να διαπιστωθεί πió προϊόν έχει την πió φιλική προς το περιβάλλον σύνθεση. Για τα σενάρια τέλους ζωής του προϊόντος (EoL scenarios), μίας και οι πληροφορίες δεν υπήρχαν στην βάση δεδομένων και δεν υπήρχε χρόνος να προστεθούν εκεί, θα αναφερθούν μόνο βιβλιογραφικές πηγές και όχι αποτελέσματα από το SimaPRO.

Τα χάρτινα ποτήρια μοντελοποιήθηκαν με βάση ένα τυπικό χάρτινο ποτήρι που είναι διαθέσιμο στην αγορά με επικάλυψη από LDPE. Με βάση πειραματικές μετρήσεις μάζας και διαστάσεων αυτού, προέκυψε πως έχει επιφάνεια 254.92 cm<sup>2</sup> και μάζα 10 g. Θεωρώντας την επικάλυψη περίπου 19 μm (μία τυπική τιμή της) το ίδιο το ποτήρι θα ζυγίζει 9.55

g. Η επικάλυψη είναι διαφορετική για τα δύο χάρτινα ποτήρια που μοντελοποιήθηκαν, με το PLA να ζυγίζει 0.27 g και το PBS 0.14 g (με βάση την μάζα ανά μονάδα επιφάνειας χαρτιού που υπολογίστηκε παραπάνω). Τα πολυμερή αυτά προστέθηκαν στο χαρτί με εκβολή [7, 9]. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί πως το PBS δεν υπήρχε στην βάση δεδομένων και έπρεπε να μοντελοποιηθεί από την αρχή. Οι ποσότητες και η ενεργειακή απαίτηση που χρησιμοποιήθηκαν βασίζονται στην βιβλιογραφία [18, 19]. Συγκεκριμένα, για την παραγωγή 32.508 g PBS απαιτούνται 21.24 g ηλεκτρικό οξύ και 17.82 g 1-4-βουτανεδιόλης ενώ ενεργειακά απαιτούνται 140 MJ/kg PBS.

Για τα πλαστικά ποτήρια, μοντελοποιήθηκαν με βάση ένα τυπικό πλαστικό ποτήρι των 6 g. Το πρώτο αποτελείται από PLA/PBS/Talc σε σύσταση 25/55/20 ενώ το δεύτερο από PLA και μία δευτερεύουσα φάση από συμπολυμερές ηλεκτρικού και αδιπικού οξέος σε σύσταση 80/20. Για την σύνθεση αυτού, χρησιμοποιήθηκαν οι παραπάνω ποσότητες, αλλάζοντας το μισό ηλεκτρικό οξύ σε αδιπικό [5, 10]. Τα υλικά αυτά ομογενοποιήθηκαν με εκβολή και μορφοποιήθηκαν στη μορφή του πλαστικού ποτηριού με έγχυση.

### 3 Αποτελέσματα

Έχοντας επιλέξει και αναλύσει τις τεχνολογίες που θα συγκριθούν, αξίζει να εξεταστούν με περισσότερη λεπτομέρεια για να επιβεβαιωθεί ότι περνάνε τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί.

#### 3.1 Ιδιότητες του προϊόντος

Στα χάρτινα ποτήρια δεν έχει ιδιαίτερο νόημα να εξεταστούν οι ιδιότητες του χαρτιού, καθώς είναι ίδιες σε κάθε περίπτωση. Αυτό που έχει αρκετό ενδιαφέρον όμως είναι να δει κανείς πόση επικάλυψη χρειάζεται για το καθένα. Για παράδειγμα, μία τυπική τιμή για επικάλυψη από LDPE είναι 17.7 g/m<sup>2</sup> ενώ το PLA σε βέλτιστες συνθήκες εκβολής μπορεί να φτάσει τα 10.6 g/m<sup>2</sup> [7]. Ακόμη, το PBS φτάνει μέχρι και 5.5 g/m<sup>2</sup> [9]. Είναι προφανές πως όσο μικρότερη ποσότητα απαιτείται τόσο καλύτερο καθώς θα πετυχαίνουμε ένα παρόμοιο ποιοτικό υλικό με λιγότερες πρώτες ύλες.

Για τα άλλα υλικά αξίζει μία σύγκριση των βασικών θερμομηχανικών ιδιοτήτων τους σε σχέση με κάποιο υλικό "πρότυπο" για την εφαρμογή εκείνη, όπως το PS [5]. Για παράδειγμα, αν συγκρίνουμε το μέτρο ελαστικότητας του PS (2.5 GPa) με αυτό άλλων υλικών, το PBS έχει πολύ χαμηλό (0.5 GPa) αλλά το PLA πολύ υψηλό (3.7 GPa), ενώ αν συγκρίνουμε την θερμοκρασία θερμικής παραμόρφωσης (HDT) των δύο, το PBS και το πολυστυρένιο έχουν παρόμοια HDT ( $\approx 94^{\circ}\text{C}$ ) ενώ το PLA έχει πολύ χαμηλό ( $60^{\circ}\text{C}$ ). Έτσι, ο συνδυασμός τους προσφέρει ένα υλικό παρόμοιο του πολυστυρενίου το οποίο είναι κατάλληλο για αυτήν την εφαρμογή [5]. Το PHBV το οποίο είναι ένα άλλο υλικό που προτάθηκε παραπάνω έχει μέτρο ελαστικότητας κοντά στα 4 GPa και HDT  $142^{\circ}\text{C}$  με περιθώριο αύξησης με φυσικά πρόσθετα όπως οι ίνες από λινάρι. Αυτό δείχνει γιατί το PHBV είναι ένα αρκετά ενδιαφέρον υλικό για την εφαρμογή αυτή καθώς έχει πολύ καλές θερμομηχανικές ιδιότητες λόγω της αρκετά υψηλής του κρυσταλλικότητας αλλά είναι και το πιο εύκολο βιοδιασπώμενο υλικό από τα προτεινόμενα. Το μόνο του εμπόδιο είναι το οικονομικό, λύσεις για το οποίο θα δωθούν με περισσότερη λεπτομέρεια και παρακάτω.

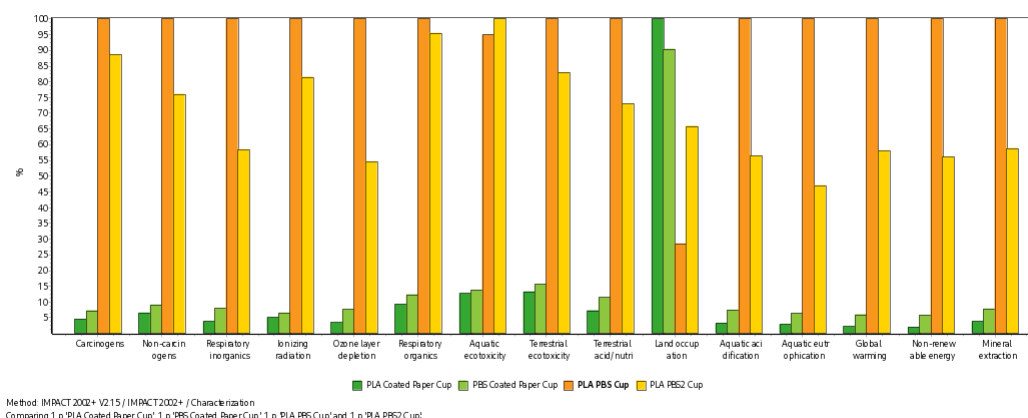
#### 3.2 Περιβαλλοντική Επίδραση

Έχοντας αναλύσει όλα τα προϊόντα που επιλέχθηκαν και γιατί θεωρούνται κατάλληλα για μία εφαρμογή σαν αυτή, είναι απαραίτητο να εξεταστεί περαιτέρω η περιβαλλοντική επίδραση του κάθε προϊόντος. Αρχικά, πρέπει να εξεταστεί η παραγωγή του προϊόντος και έπειτα η απόρριψή του.



### 3.2.1 Ανάλυση Κύκλου Ζωής

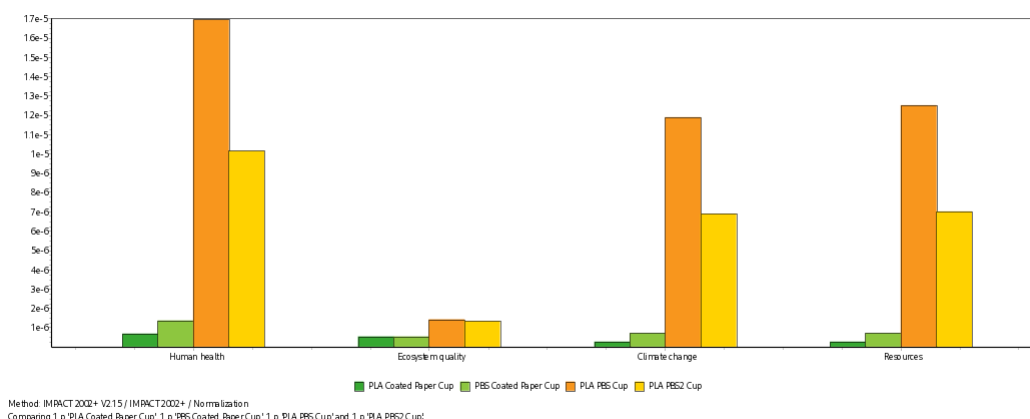
Η ανάλυση κύκλου ζωής που έγινε είχε ως σκοπό την μελέτη ποιό προϊόν είναι πιο φιλικό προς το περιβάλλον κατά την παραγωγή του. Έχει αρκετές ελλείψεις, όπως ότι δεν εξετάζει ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος αλλά μόνο την σύνθεση του, δεν εξετάζει την παραγωγή του ποτηριού από PHBV και δεν εξετάζει την μορφοποίηση του χαρτιού σε ποτήρι αλλά μόνο την εκβολή του πολυμερούς σε αυτό, αλλά εξετάζει όλα τα στάδια της παραγωγής για τα πλαστικά ποτήρια. Τέλος, χρησιμοποιεί συνθετικές πρώτες ύλες και όχι βιομάζα με αποτέλεσμα αυτά να αυξάνουν την περιβαλλοντική επίδραση του προϊόντος. Έτσι, τα αποτελέσματα του δεν είναι τα πιο έμπιστα, αλλά μπορούν να μας βοηθήσουν σε κάποια πράγματα. Παρακάτω παρατίθεται ένα διάγραμμα με την επίδραση της σύνθεσης κάθε προϊόντος στο περιβάλλον.



Σχήμα 1: Επίδραση των διάφορων προϊόντων στο περιβάλλον

Από το διάγραμμα αυτό είναι εμφανές πως τα χάρτινα ποτήρια είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον σε κάθε παράγοντα εκτός από το land occupation στο οποίο είναι πολύ υψηλότερα τα χάρτινα ποτήρια λόγω της μεγάλης ποσότητας χαρτιού που χρησιμοποιούν. Βέβαια, καθώς αυτή η ανάλυση δεν έλαβε υπόψη το ενεργειακό κόστος της παραγωγής του χάρτινου ποτηριού αλλά υπέθεσε πως γίνεται κατευθείαν εκβολή του πολυμερούς στο χαρτί και επίσης δεν έχει λάβει υπόψη την διαχείριση των υλικών ως απορρίματα (όπου τα πλαστικά ποτήρια θα είναι σίγουρα πιο φιλικά προς το περιβάλλον) είναι ένα λογικό αλλά πιθανόν βεβιασμένο αποτέλεσμα. Βέβαια, λόγω της μεγάλης απόκλισης, είναι πιθανό πως ακόμη και σε ένα ολοκληρωμένο σενάριο, αυτά θα είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον. Όμως, υπάρχουν κάποιες ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις που μπορούν να γίνουν για τα προϊόντα αυτά. Αρχικά, παρότι το PBS που χρησιμοποιείται στο χάρτινο ποτήρι είναι σε μικρότερη ποσότητα από αυτό με το PLA, φαίνεται να έχει μεγαλύτερη επίδραση στο περιβάλλον. Αν χρησιμοποιηθεί ηλεκτρικό οξύ από βιομάζα, αυτή η εικόνα ίσως να βελτιωθεί, αλλά αυτό είναι κάτι που αξίζει να λάβει κανείς υπόψη του. Αυτό μπορεί να παίζει και ρόλο στην σύγκριση των 2 πλαστικών ποτηριών όπου το ποτήρι με τη μεγάλη περιεκτικότητα σε PBS (πορτοκαλί) έχει μεγαλύτερη επίδραση. Βέβαια, στην σύγκριση αυτή πολύ σημαντικό ρόλο παίζει και η χρήση του talc. Το talc είναι ένα ανόργανο πρόσθετο και η μόνη μη βιοδιασπώμενη ουσία που χρησιμοποιείται στην σύνθεση αυτών. Είναι αρκετά πιθανό πως η προσθήκη του κάνει το προϊόν λιγότερο φιλικό προς το περιβάλλον, ακόμη και αν βελτιώνει τις ιδιότητες του. Επίσης όμως αξίζει να σκεφτεί κανείς και προβλήματα που έχουν παρατηρηθεί σε υπάρχοντα χάρτινα ποτήρια όπως η ύπαρξη νανοσωματιδίων πολυμερούς μέσα στο ρόφημα [3] το οποίο το λογισμικό δεν έχει λάβει υπόψη αλλά σίγουρα θα αύξανε την επίδραση που έχει το προϊόν στον άνθρωπο. Βέβαια, αξίζει να δει κανείς και ένα διάγραμμα με απόλυτη και όχι σχετική κλίμακα, για να αξιολογήσει αν έχουν πραγματικά σημασία οι αποκλίσεις αυτές. Το

SimaPRO δίνει ένα διάγραμμα σε απόλυτη κλίμακα με τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές επιδράσεις των προϊόντων το οποίο φαίνεται παρακάτω.



Σχήμα 2: Διάγραμμα απόλυτων επιδράσεων των προϊόντων στο περιβάλλον

Όπως φαίνεται από το διάγραμμα αυτό, παρόλο που όντως τα χάρτινα ποτήρια είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον, η διαφορά τους είναι το πολύ μία τάξη μεγέθους μεταξύ των  $10^{-6}$  και  $10^{-5}$ . Άρα, παρόλο που μας δίνει κάποιες χρήσιμες συγκριτικές πληροφορίες η ανάλυση κύκλου ζωής αυτή, η επίδραση όλων των προϊόντων είναι αρκετά χαμηλή για να μην αξίζει να απορριφθεί κάποια από τις τεχνολογίες λόγω αυτού του παράγοντα. Αν ήταν πιο ολοκληρωμένη και περιείχε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος ίσως να μπορούσε να απορρίψει κάποιο προϊόν.

### 3.2.2 Σενάρια Τέλους Ζωής

Έτσι, καθώς όλες οι τεχνολογίες είναι αρκετά φιλικές προς το περιβάλλον κατά την σύνθεση τους, σημαντικό ρόλο θα παίζει πως μπορούμε να διαχειριστούμε κάθε προϊόν στο τέλος ζωής του. Στα χάρτινα ποτήρια υπάρχει ένα πρόβλημα διαχείρισης, το οποίο είναι και το μεγαλύτερο πρόβλημα που έχει η τεχνολογία αυτή. Από τη μία, τα δύο υλικά θα μπορούσαν να ανακυκλωθούν/κομποστοποιηθούν ταυτόχρονα [7]. Όμως αν ανακυκλωθούν μαζί χαρτί και πολυμερές, αυξάνεται σημαντικά ο χρόνος ή η θερμοκρασία που πρέπει να φτάσουμε για την αποσύνθεση, ειδικά αν το πολυμερές είναι PLA. Αυτό είναι διότι παρόλο που τα πολυμερή αυτά είναι βιοδιασπώμενα, συγκριτικά με την κυτταρίνη, το βασικό συστατικό του χαρτιού, η αποσύνθεσή τους είναι πολύ αργή [5]. Αντίθετα, αν τα δύο ρεύματα διαχωριστούν, είναι αρκετά εύκολη η διαχείρισή τους, αλλά ανεβαίνει αρκετά το κόστος της διαχείρισης.

Από την άλλη, τα πλαστικά ποτήρια είναι πάρα πολύ πιο εύκολο να διαχειριστούν ως απόβλητα. Είναι φτιαγμένα από βιοαποδομήσιμα πολυμερή και δεν απαιτείται κάποιος διαχωρισμός για να κομποστοποιηθούν σε ικανοποιητικό ρυθμό. Έτσι η διαχείρισή τους είναι πολύ πιο εύκολη. Κάτι όμως που αξίζει να αναφερθεί και κάνει το ποτήρι από PHBV ίσως την καλύτερη επιλογή είναι πως το PLA και το PBS είναι υλικά τα οποία είναι πιστοποιημένα βιοαποδομήσιμα [20], όμως απαιτούν βιομηχανικές συνθήκες επεξεργασίας, ενώ το PHBV και γενικότερα η "οικογένεια" των PHAs είναι βιοαποδομήσιμα από μικροοργανισμούς σε μεγάλο εύρος συνθηκών. Άρα, ακόμη και αν δεν τα διαχειριστεί κανείς όπως πρέπει, μπορούν να αποδομηθούν, κάτι πάρα πολύ χρήσιμο για προϊόντα τόσο ευρείας χρήσης όσο τα ποτήρια καφέ. Για αυτό, από την άποψη αυτή, το ποτήρι από PHBV είναι σίγουρα η πιο φιλική προς το περιβάλλον λύση που μπορεί να προταθεί.

### 3.3 Οικονομική Ανάλυση

Από οικονομικής άποψης, τα χάρτινα ποτήρια είναι σίγουρα τα φθηνότερα καθώς απαιτούν μικρή ποσότητα πολυμερούς και είναι κατά βάση χαρτί που είναι μία φθηνή πρώτη ύλη. Όμως, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, τα χάρτινα ποτήρια είναι πιο απαιτητικά στην διαχείριση. Για αυτό, παρόλο που είναι φθηνά στην παραγωγή, μπορεί να έχουν αυξημένο κόστος στην διαχείριση. Για τον λόγο αυτόν, δεν είναι ιδανικά σαν επιλογή. Αν θέλουμε πάντως να συγκρίνουμε μεταξύ τους τις 2 επιλογές για χάρτινο ποτήρι, η επικάλυψη από PBS απαιτεί περίπου τη μισή ποσότητα από το αντίστοιχο PLA σύμφωνα με την βιβλιογραφία [9] και το PBS είναι υλικό που μπορεί να αποδομηθεί πιο εύκολα από το PLA [21]. Έτσι, παρόλο που είναι λίγο πιο ακριβό υλικό, αυτά τα χαρακτηριστικά μπορούν να το κάνουν πιο επιθυμητό για μαζική παραγωγή. Βέβαια, αξίζει να παρατηρηθεί περισσότερο η αγορά των βιοπολυμερών, καθώς η υιοθέτηση του PLA είναι ταχύτερη και είναι πιθανό να μειωθεί σημαντικά το κόστος του τα επόμενα χρόνια [2] .

Αντίθετα, η πιο ακριβή επιλογή είναι το PHBV. Είναι ένα νέο σχετικά πολυμερές το οποίο παράγεται από μικροοργανισμούς και η παραγωγή του είναι ακόμη αρκετά ακριβή [11] . Για αυτό, στην παρούσα θα ήταν δύσκολο να αιτιολογήσει κανείς την χρήση αυτού του υλικού για κάτι όσο μαζικό όσο τα ποτήρια καφέ. Βέβαια, υπάρχει πολύ βιβλιογραφία που μελετά πως τα υλικά αυτά μπορούν να γίνουν πολύ φθηνότερα. Προφανώς, η διεργασία της παραγωγής του PHBV πρέπει να μελετηθεί περισσότερο και εν τέλει να βελτιστοποιηθεί για να έχει το ελάχιστο δυνατό κόστος. Αυτό όμως, δεν φτάνει για να κάνει το υλικό ανταγωνιστικό με άλλα βιοπολυμερή και άρα προφανώς όχι και με τα παραδοσιακά πολυμερή. Για αυτό, μία εύκολη λύση είναι η προσθήκη φθηνών βιολογικών πρόσθετων τα οποία αν επιλεγθούν με τον κατάλληλο τρόπο μπορούν και να βελτιώσουν τις ιδιότητες του υλικού [13, 14]. Ένα από τα καλύτερα πρόσθετα σύμφωνα με αυτές τις πηγές είναι οι ίνες λιναριού οι οποίες και μειώνουν αρκετά το κόστος του υλικού καθώς είναι φθηνή πρώτη ύλη αλλά και βελτιώνουν αρκετά τις ιδιότητες του [6, 17]. Ακόμη, θεωρείται πως πολύ σημαντικό ρόλο στην τιμή του προϊόντος παίζει και η πρώτη ύλη του. Αν μπορούν να χρησιμοποιηθούν φθηνά υποστρώματα για την παραγωγή του (με προφανές παράδειγμα τα απόβλητα) τότε πρακτικά αφαιρείται το πάγιο κόστος της πρώτης ύλης και υπάρχει μόνο το κόστος των μικροοργανισμών και της ίδιας της διεργασίας. Υπάρχει αρκετή βιβλιογραφία που εξετάζει το θέμα των βιοδιυλιστηρίων, που είναι εργοστάσια που εκμεταλλεύονται λιγνοκυτταρινικά απόβλητα για την παραγωγή πολλών χρήσιμων προϊόντων και βασικό τους πλεονέκτημα είναι πως κάνουν την τιμή όλων των προϊόντων αυτών χαμηλότερη [15, 16, 22]. Ορισμένα άρθρα εστιάζουν και στην παραγωγή PHAs από βιοαπόβλητα στα πλαίσια ενός βιοδιυλιστηρίου [15] . Αυτή η ιδέα είναι κάτι το οποίο κρίνεται απαραίτητο για να υιοθετηθούν γενικά τα βιοπολαστικά. Παρόλο που το πιο εύκολο παράδειγμα είναι τα PHAs τα οποία είναι τα ακριβότερα, ούτε πολυμερή όπως το PLA είναι σε τιμή παρόμοια υλικών όπως το πολυαιθυλένιο. Με την μαζική υιοθέτηση των βιοδιυλιστηρίων και την παραγωγή βιοπολυμερών από απόβλητα, θεωρείται πως αυτά τα υλικά θα γίνουν αρκετά φθηνά. Για αυτό, παρόλο που τα PHAs είναι μάλλον η χειρότερη οικονομικά επιλογή αυτή τη στιγμή, υπάρχει πολύ έρευνα γύρω από το θέμα και θεωρείται πως θα μπορέσει να φτάσει σε ανταγωνιστική τιμή.

Μέχρι τότε όμως, είναι καλύτερη επιλογή η χρήση ενός πλαστικού ποτηριού από PLA/PBS/Talc το οποίο είναι αρκετά πιο φθηνό έχοντας όμως και αυτό πολλά περιθώρια βελτίωσης. Μπορεί να ανταγωνιστεί τα πλαστικά ποτήρια τα οποία έχουν αρχίσει να καταργούνται και προβλέπεται πως θα μπορέσει να γίνει πιο ιδανική επιλογή καθώς πέφτει η τιμή των υλικών αυτών.

## 4 Συμπεράσματα & Προτάσεις

Αποτέλεσμα της ανάλυσης αυτής είναι πως όλα τα προϊόντα αυτά είναι σίγουρα φιλικά προς το περιβάλλον και κατάλληλα για αντικατάσταση των πλαστικών ή και χάρτινων ποτηριών που υπάρχουν στην αγορά. Η ευκολότερη λύση να χρησιμοποιηθεί άμεσα στην αγορά είναι ένα χάρτινο ποτήρι με επικάλυψη από PLA. Τα χάρτινα ποτήρια έχουν υιοθετηθεί ως μία φθηνή λύση η οποία είναι φιλική προς το περιβάλλον και η προσθήκη μίας επικάλυψης από βιοπολυμερές, με το PLA να είναι το πιο κατάλληλο καθώς είναι σίγουρα το φθηνότερο και το πιο μελετημένο βιοπολυμερές είναι μία πολύ καλή λύση. Εναλλακτικά, και η χρήση PBS ως επικάλυψη είναι ενδιαφέρουσα καθώς το PBS αποδομείται πιο γρήγορα από το PLA [21] και απαιτείται μικρότερη ποσότητα του για να αποκτήσει τις επιθυμητές ιδιότητες [9]. Όμως είναι πιο ακριβό και λιγότερο μελετημένο από το PLA. Βέβαια, σε κάθε περίπτωση, λόγω της μαζικότητας του προϊόντος αυτού, ίσως παρουσιαστεί πρόβλημα στο τέλος ζωής των προϊόντων λόγω ορισμένων δυσκολιών που υπάρχουν στην αντιμετώπιση του. Για αυτό, καθώς μελετώνται περισσότερο βιοπολυμερή όπως το PLA ή το PBS, θεωρείται πως ένα μίγμα των δύο θα γίνει η ιδανική επιλογή καθώς είναι πολύ εύκολα διαχειρίσιμο ως απόβλητο, έχει πολύ καλές ιδιότητες και υπολογίζεται πως μπορεί να γίνει φθηνότερο.

Βέβαια, περαιτέρω έρευνα πρέπει να γίνει πάνω στα βιοδιυλιστήρια, τα οποία θεωρείται ότι είναι πολύ σημαντικά για την δημιουργία φθηνών βιοπολυμερών για μαζική χρήση. Προβλέπεται πως αυτά θα είναι το μέλλον της βιομηχανίας πλαστικών [16]. Ακόμη, πρέπει να μελετηθούν πολύ περισσότερο τα PHAs και ιδιαίτερα στην εφαρμογή αυτή καθώς μόλις βελτιστοποιηθεί η παραγωγή τους και είναι σε ένα συγκρίσιμο κόστος με τα υπόλοιπα βιοπολυμερή, το PHBV προβλέπεται πως θα είναι η ιδανική επιλογή από κάθε άποψη για ποτήρια καφέ μίας χρήσης. Επίσης, για μία πιο ολοκληρωμένη εικόνα της περιβαλλοντικής επίδρασης του κάθε προϊόντος, κάτι απαραίτητο για την τελική αξιολόγηση τους και μαζικοποίηση τους είναι μία πιο ολοκληρωμένη ανάλυση κύκλου ζωής των προϊόντων στην οποία θα συμπεριληφθεί όχι μόνο η παραγωγή των προϊόντων αλλά και η απόρριψη τους με διάφορα πιθανά σενάρια δημιουργώντας έτσι έναν ολοκληρωμένο κύκλο ζωής. Ιδιαίτερα θα ήταν και πολύ ενδιαφέρον αν η ανάλυση δεν ξεκινούσε και από τα πλαστικά αλλά από βιομάζα και έδειχνε πως από αυτήν μπορεί να δημιουργηθεί το ποτήρι και πως αυτό μπορεί να διαχειριστεί για την επαναπαραγωγή της βιομάζας. Αυτή θα ήταν μία ολοκληρωμένη ανάλυση που θα μπορούσε να αιτιολογήσει ποιο προϊόν είναι πραγματικά καλύτερο. Και προφανώς σε μία τέτοια ανάλυση θα πρέπει κάπως να μοντελοποιηθεί και το PHBV ως υλικό το οποίο δεν έγινε στην παρούσα μελέτη. Τέλος, θα μπορούσε να γίνει μία πιο εκτενής οικονομική ανάλυση της κάθε τεχνολογίας στην οποία θα μπορούσε να συμπεριληφθεί και η περιβαλλοντική επίδραση του προϊόντος. Υπάρχουν διάφοροι δείκτες όπως ο Eco-Efficiency οι οποίοι συνδυάζουν τα αποτελέσματα περιβαλλοντικών και οικονομικών αναλύσεων για να δώσουν ένα τελικό αποτέλεσμα του ποιά τεχνολογία είναι καλύτερη [23]. Υπό την προϋπόθεση ότι όλα τα προϊόντα περνούν τις προδιαγραφές που έχουν τεθεί, ένας τέτοιος δείκτης που λαμβάνει υπόψη και περιβαλλοντική επίδραση και κόστος μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για να κρίνει ποιά τεχνολογία είναι στην πραγματικότητα η καλύτερη.

## 5 Βιβλιογραφία

### References

- [1] Martin A. Hubbe. PAPER'S RESISTANCE TO WETTING – A REVIEW OF INTERNAL SIZING CHEMICALS AND THEIR EFFECTS. 2(1):106–145.
- [2] Nick Triantafillopoulos and Alexander A. Koukoulas. The future of single-use paper coffee cups: Current progress and outlook. 15(3):7260.

- [3] Christopher D. Zangmeister, James G. Radney, Kurt D. Benkstein, and Berc Kalanyan. Common Single-Use Consumer Plastic Products Release Trillions of Sub-100 nm Nanoparticles per Liter into Water during Normal Use | Environmental Science & Technology.
- [4] Sukhbir Sandhu, Sumit Lodhia, Alana Potts, and Robert Crocker. Environment friendly takeaway coffee cup use: Individual and institutional enablers and barriers. 291:125271.
- [5] Maria Rossella Nobile, Pierfrancesco Cerruti, Mario Malinconico, and Roberto Pantani. Processing and properties of biodegradable compounds based on aliphatic polyesters. 132(48).
- [6] N. M. Barkoula, S. K. Garkhail, and T. Peijs. Biodegradable composites based on flax/polyhydroxybutyrate and its copolymer with hydroxyvalerate. 31(1):34–42.
- [7] N. Whiteman, A. Auchter, A. Christie, and M. Prue. Rethinking the paper cup — beginning with extrusion process optimization for compostability and recyclability. 20(6):353–362.
- [8] Benjamin Maldonado-García, Akhilesh K. Pal, Manjusri Misra, Stefano Gregori, and Amar K. Mohanty. Sustainable 3D printed composites from recycled ocean plastics and pyrolyzed soy-hulls: Optimization of printing parameters, performance studies and prototypes development. 6:100197.
- [9] Henry Thurber and Greg Curtzwiler. Suitability of poly(butylene succinate) as a coating for paperboard convenience food packaging. 2(1):1–12.
- [10] M. Barletta and M. Puopolo. Thermo-Mechanical Properties of Injection Molded Components Manufactured by Engineered Biodegradable Blends. 27(10):2105–2118.
- [11] E. Bugnicourt, P. Cinelli, A. Lazzeri, and V. Alvarez. Polyhydroxyalkanoate (PHA): Review of synthesis, characteristics, processing and potential applications in packaging. 8(11):791–808.
- [12] A. Naik, C. J. Lewis, and K. P. Allison. Temperature dissociation of liquids in reusable thermoplastic containers—An eco-friendly scald risk? 45(7):1621–1624.
- [13] J.R. Robledo-Ortíz, M.E. González-López, A.S. Martín del Campo, and A.A. Pérez-Fonseca. Lignocellulosic Materials as Reinforcement of Polyhydroxybutyrate and its Copolymer with Hydroxyvalerate: A Review. 29(5):1350–1364.
- [14] N. Gómez-Gast, M.D.R.L. Cuellar, B. Vergara-Porras, and H. Vieyra. Biopackaging Potential Alternatives: Bioplastic Composites of Polyhydroxyalkanoates and Vegetal Fibers. 14(6).
- [15] Aderemi T. Adeleye, Chuks Kenneth Odoh, Obieze Christian Enudi, Oluwakemi Oluwabunmi Banjoko, Osigbeminiyi Oludare Osiboye, Emmanuel Toluwalope Odediran, and Hitler Louis. Sustainable synthesis and applications of polyhydroxyalkanoates (PHAs) from biomass. 96:174–193.
- [16] A. Susmozas, R. Martín-Sampedro, D. Ibarra, M.E. Eugenio, R. Iglesias, P. Manzanares, and A.D. Moreno. Process strategies for the transition of 1G to advanced bioethanol production. 8(10):1–45.

- [17] Zain Zaidi and Alan Crosky. Unidirectional Rubber-Toughened Green Composites Based on PHBV. 11(8):2411.
- [18] Akihiro Oishi, Min Zhang, Kazuo Nakayama, Takashi Masuda, and Yoichi Taguchi. Synthesis of Poly(butylene succinate) and Poly(ethylene succinate) Including Diglycollate Moiety. 38(7):710–715.
- [19] Hassan Moussa and Steven Young. *POLYBUTYLENE SUCCINATE LIFE CYCLE ASSESSMENT VARIATIONS AND VARIABLES*.
- [20] ASTM D5988-12 - Standard Test Method for Determining Aerobic Biodegradation of Plastic Materials in Soil.
- [21] Dinesh Adhikari, Mukai Masaki, Kenzo Kubota, Takamitsu Kai, Nobuyuki Kaneko, Kiwako Araki, and Motoki Kubo. Degradation of Bioplastics in Soil and Their Degradation Effects on Environmental Microorganisms. 05:23–34.
- [22] S.M. Ioannidou, C. Pateraki, D. Ladakis, H. Papapostolou, M. Tsakona, A. Vlysidis, I.K. Kookos, and A. Koutinas. Sustainable production of bio-based chemicals and polymers via integrated biomass refining and bioprocessing in a circular bioeconomy context. 307.
- [23] Kunnika Changwichan, Thapat Silalertruksa, and Shabbir H. Gheewala. Eco-Efficiency Assessment of Bioplastics Production Systems and End-of-Life Options. 10(4):952.