



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΑΥΤΟΜΑΤΙΣΜΟΥ»

Μεταπτυχιακή Εργασία

**Διεργασίες, τεχνικές και τεχνολογίες επεξεργασίας αποβλήτων
χαρτοβιομηχανίας**

Αγγελική Τσαπικούνη

Επιβλέπων Καθηγητής: Ευάγγελος Καπετάνιος

ΑΘΗΝΑ 2014

Περίληψη

Σε πολλές ευρωπαϊκές χώρες, η βιομηχανία παραγωγής χάρτου αποτελεί ένα σημαντικό κλάδο της οικονομικής και βιομηχανικής ανάπτυξης τους. Η παραγωγή χάρτου ουσιαστικά ξεκίνησε πριν από 2000 χρόνια περίπου στην Κίνα, με χρήση ινών από το φυτό *Cannabis sativa* L., ακολούθως χρησιμοποιήθηκαν ίνες από λινάρι, βαμβάκι και γενικά, από οποιοδήποτε είδος ξυλείας ήταν διαθέσιμο στα δάση. Από τη βιομηχανία του χαρτιού πλέον έχει δημιουργηθεί μια πληθώρα προϊόντων, μερικά από τα οποία είναι χαρτί περιτυλίγματος, χάρτινες συσκευασίες για τρόφιμα, χαρτική ύλη, χαρτί για βιομηχανική χρήση (φίλτρα, μονωτικά, αντί-λπαντικά), κ.ά. Η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση σε προϊόντα χάρτου τα τελευταία χρόνια οδήγησε στη μείωση πολλών δασών και δασικών εκτάσεων, με αποτέλεσμα να αναζητούνται τρόποι ορθολογικότερης παραγωγής και χρήσης του. Επειδή η βιομηχανία παραγωγής χάρτου έχει μακρόχρονη ιστορία και επειδή υπήρξε ταυτόχρονη ανάπτυξη του τομέα σε πολλές χώρες, δημιουργήθηκε μεγάλη ποικιλία στην διαδικασία παραγωγής χαρτιού. Η αυξημένη ζήτηση σε προϊόντα χάρτου ωθεί σε συνεχή αύξηση της παραγωγής, γεγονός που αναγκάζει την επιστημονική κοινότητα να ανησυχεί τόσο για την καταστροφή των φυσικών πόρων (δάση, κλπ.), όσο και για τις επιπτώσεις των αποβλήτων των παραγωγικών μονάδων στο περιβάλλον.

Τα κύρια περιβαλλοντικά προβλήματα που σχετίζονται με την παραγωγή χάρτινων προϊόντων είναι η μεγάλη κατανάλωση νερού, η κατανάλωση ενέργειας, η δημιουργία υγρών αποβλήτων με υψηλό οργανικό φορτίο, τα στερεά απόβλητα, οι αέριοι ρύποι και οι οργανοαλογονωμένες ενώσεις (Adsorbable Organic Halogens - AOX).

Έντεκα εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων παράγονται ανά έτος από την Ευρωπαϊκή βιομηχανία πολτού και χάρτου, από τα οποία το 70% προκύπτει από την χρήση ανακυκλώσιμου χαρτιού. Η βιομηχανία πολτού και χάρτου έχει αντιμετωπίσει πολλούς αυστηρούς περιορισμούς όσον αφορά τις εκκενώσεις κατά τις τελευταίες δεκαετίες και η ίδια τάση θα συνεχιστεί στο μέλλον.

Στις βιομηχανίες παραγωγής χάρτου το νερό χρησιμοποιείται κυρίως για την διάλυση των πρώτων υλών και τη δημιουργία αιωρήματος ινών, για τον καθαρισμό της γραμμής παραγωγής, καθώς και για την εφαρμογή των κανόνων υγιεινής. Μέρος του υγρού αυτού καταλήγει στα υγρά απόβλητα, μαζί με προσμίξεις από τα καθαριστικά υλικά και διάφορα προϊόντα από την επεξεργασία όπως σταθεροποιητές, λευκαντικά, χρωστικές, διαλυτικά και βιοκτόνα. Η αυξημένη ανάγκη για μείωση της κατανάλωσης νερού έχει εξαναγκάσει τους μύλους πολτού να αναπτύξουν πιο αποτελεσματικές τεχνικές για την έκπλυση του πολτού. Η κυκλοφορία του νερού έχει αυξηθεί και η εσωτερική του επεξεργασία χρησιμοποιείται στις μέρες μας. Η έλλειψη νερού είναι ήδη ένα σημαντικό πρόβλημα σε πολλές χώρες.

Τα στερεά απόβλητα αποτελούνται κυρίως από ιλύ που προέρχεται από την πρωτοβάθμια επεξεργασία των αποβλήτων (όπου αυτή πραγματοποιείται), από απορρίμματα και σκόνες.

Οι αέριοι ρύποι προέρχονται από τις καύσεις λειτουργίας των μηχανημάτων, από σκόνες στη γραμμή παραγωγής και οσμές.

Λόγω νομοθεσίας και αυξημένων φόρων, οι χωματερές αμέσως εξαιρούνται ως επιλογή για τον τελικό προορισμό των αποβλήτων, και η αποτέφρωση σε συνδυασμό με ανάκτηση ενέργειας γίνεται η κύρια μέθοδος επεξεργασίας στερεών αποβλήτων χαρτοβιομηχανίας. Άλλες επιλογές όπως η πυρόλυση, η αεριοποίηση, η κομποστοποίηση και η χρήση τους ως υλικά κατασκευής εφαρμόζονται, αλλά χρειάζεται ακόμα έρευνα για τη βελτιστοποίηση αυτών των διεργασιών. Τα υγρά απόβλητα επεξεργάζονται κυρίως μέσω βιολογικών επεξεργασιών, ενώ οι αέριοι ρύποι χρησιμοποιούν άλλες τεχνολογίες. Το 1980, η επεξεργασία ενεργούς ιλύος εισήχθη

σε πολλούς μύλους. Λόγω των μεγάλων όγκων αποβλήτων που παράγονται, της υψηλής περιεκτικότητας σε υγρασία και της αλλαγής στη σύνθεση τους ως αποτέλεσμα των συνθηκών διεργασίας, οι μέθοδοι επεξεργασίας είναι συχνά ακριβές και ο περιβαλλοντικός τους αντίκτυπος είναι ακόμα αβέβαιος. Για αυτό το λόγο, είναι απαραίτητο να συνεχιστούν οι έρευνες σε διαφορετικές εφαρμογές αποβλήτων, λαμβάνοντας υπόψη τους περιβαλλοντικούς και οικονομικούς παράγοντες αυτών των επεξεργασιών αποβλήτων.

Ένας σημαντικός στόχος της χαρτοβιομηχανίας είναι η μείωση των συνεπειών στο περιβάλλον με την ελαχιστοποίηση των αποβλήτων της, την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση. Η χρήση των Βέλτιστων Διαθέσιμων Τεχνικών (Best Available Techniques - BATs) και πρωτοποριακών μεθόδων αποτελεί ένα πολύ σημαντικό θέμα. Το στάδιο της απολιγνίνωσης με οξυγόνο μείωσε το φορτίο ρύπων στα απόβλητα επειδή το νερό που χρησιμοποιείται σε αυτό το στάδιο ανακυκλώνεται στο σύστημα ανάκτησης. Η αντικατάσταση του χλωρίου (Cl_2) στη λεύκανση από λεύκανση ελεύθερη από χλώριο (ECF – Elemental Chlorine Free) ή συνολικά χωρίς χλώριο (TCF – Total Chlorine Free) έχει δραστικά μειώσει τις εκκενώσεις των ΑΟΧ. Όμως, ακόμα και αν τα παραπάνω δεν μπορούν να εφαρμοστούν, τελικά πρέπει να χρησιμοποιηθούν τεχνικές επεξεργασίας των αποβλήτων οι οποίες να μειώνουν τον όγκο τους ή και να τα εξαλείφουν χωρίς να επηρεάζουν το περιβάλλον, λόγω των μεγάλων ποσοτήτων αποβλήτων που παράγονται. Ο αποχρωματισμός τους, τουλάχιστον, πρέπει να εκτελείται. Οι συμβατικές βιολογικές διεργασίες επεξεργασίας έχουν μικρό ή και καθόλου αποτέλεσμα στον αποχρωματισμό. Η καφετί απόχρωση κυρίως αποδίδεται στη λιγνίνη και στα παράγωγά της, που είναι δύσκολο να αποσυντεθούν φυσικά. Έχει σημειωθεί ότι η λιγνίνη μπορεί να έχει ένα ανασταλτικό αποτέλεσμα στους ζωντανούς οργανισμούς.

Abstract

In many European countries, the paper industry is an important sector of their economic and industrial development. The paper production actually started about 2000 years ago in China, using fibers from the plant *Cannabis sativa* L., subsequently used fibers from flax, cotton and generally any kind of wood that was available in the forests. The paper industry has now created a plethora of products, some of which are wrapping paper, paper food packaging, paper for industrial use (filters, insulation, anti-lubricants), etc. The increasing demand for paper products in recent years has led to the destruction of many forests and woodlands, thus seeking ways to improve production and use of it. Because of the long history of the paper industry and the concurrent development of this sector in many countries, a great variety in the paper production process has been created. The increased demand of paper products pushes for a continuous increase in production, forcing the scientific community to be concerned about the destruction of natural resources (forests, etc.), and the impact of waste production units in the environment too.

The main environmental problems associated with the production of paper products are the large water consumption, energy consumption, creating wastewater with high organic load, solid waste, air pollutants and organoalogenomenes compounds (Adsorbable Organic Halogens - AOX).

Eleven million tons of waste is produced per year by the European pulp and paper industry, of which 70% is generated from the use of recycled paper. The pulp and paper industry has faced many severe restrictions on waste discharges in recent decades and this trend will continue in the future.

In the pulp and paper industry, water is mainly used for the dissolution of raw materials and suspended fiber to clean the production line, and the implementation of hygiene rules. Part of this liquid ends as waste water, along with contaminants from the cleaning materials and various products of the processing as stabilizers, brighteners, dyes, solvents and biocides. The increased need for reducing water consumption has forced the pulp mills to develop more effective techniques for pulp washing. The circulation of water has increased and its internal process is used nowadays. Water scarcity is already a major problem in many countries.

The solid waste is composed mainly of sludge from the primary waste treatment (where is performed), waste and powders.

The gaseous pollutants result from the combustion operation of machinery, dust on the production line and odors.

Because of the legislation and increased taxes, landfills immediately are excluded as an option for the final destination of waste and incineration combined with energy recovery is the main method of treating waste paper industry. Other options such as pyrolysis, gasification, composting and use as construction materials can be applied, but research is still needed to optimize these processes. Liquid wastes are treated mainly through biological processes, while gaseous pollutants using other technologies. In 1980, the activated sludge process was introduced in many mills. Due to the large volumes of waste generated, the high moisture content and the change in composition as a result of process conditions, processing methods are often expensive and their environmental impact is still uncertain. For this reason, it is necessary to continue investigations in different applications of waste, taking into account environmental and economic factors of these waste processes.

An important goal of the paper industry is the reduction of environmental impact by minimizing waste, reusing and recycling. The use of BAT (Best Available Techniques - BATs) and innovative methods is a very important issue. The stage of delignification with oxygen reduced

the pollution load in waste because the water used in this step is recycled to the recovery system. The replacement of chlorine (Cl_2) in bleaching chlorine-free method (ECF - Elemental Chlorine Free) or totally chlorine free method (TCF - Total Chlorine Free) has drastically reduced discharges of AOX. However, even if these measures cannot be applied, ultimately waste treatment techniques must be used, which reduce its volume or remove it, without affecting the environment due to the large amounts of waste produced. Discoloration, at least, should be performed. Conventional biological treatment processes have little or no effect on discoloration. The brownish tint primarily results from lignin and its derivatives, which are difficult to be decomposed naturally. It has been noted that the lignin can have an inhibitory effect on living organisms

Περιεχόμενα

Περίληψη	2
Abstract.....	4
Κατάλογος Εικόνων	13
Κατάλογος Σχημάτων	14
Κατάλογος Πινάκων	19
Κατάλογος Συμβόλων	20
1 Εισαγωγή	22
1.1 Σκοπός Εργασίας	22
1.2 Δομή Εργασίας	22
2 Εισαγωγή στη θεωρία βιομηχανικών αποβλήτων	24
2.1 Ορισμοί.....	24
2.2 Το νομικό πλαίσιο για τη βιομηχανία.....	24
2.2.1 Ειδικότερα για την Οδηγία 96 / 61 / ΕΚ (L257 / 10.10.96).....	25
2.3 Οι κύριες περιβαλλοντικές απειλές.....	25
2.3.1 Ρύπανση της ατμόσφαιρας.....	26
2.3.2 Ρύπανση του εδάφους.....	27
2.3.3 Ρύπανση των υδάτων.....	28
2.4 Βιομηχανικά απόβλητα.....	28
2.4.1 Σύσταση βιομηχανικών αποβλήτων.....	29
2.4.1.1 Φυσικοί ρυπαντές βιομηχανικών αποβλήτων.....	29
2.4.1.2 Χημικοί ρυπαντές βιομηχανικών αποβλήτων.....	29
3 Εισαγωγή στη χαρτοβιομηχανία.....	30
3.1 Γενικά.....	30
3.2 Ιστορική αναδρομή.....	32
3.2.1 Σύγχρονη κατασκευή χαρτιού.....	33
3.3 Συστατικά στοιχεία χαρτοβιομηχανίας.....	34
3.4 Συνολική παραγωγική διαδικασία χαρτοβιομηχανίας.....	35
3.4.1 Χημική σύσταση ξύλου.....	38
3.4.2 Τεχνικές πολτοποίησης ξύλου.....	38

3.4.2.1 Μηχανική πολτοποίηση.....	38
3.4.2.2 Χημική πολτοποίηση.....	40
3.4.2.2.1 Χημική πολτοποίηση kraft.....	40
3.4.2.3 Ημιχημική πολτοποίηση.....	41
3.4.2.4 Επεξεργασία ανακυκλωμένων ινών.....	42
3.4.2.4.1 Πολτοποίηση ανακυκλωμένων ινών.....	44
3.4.2.4.2 Απομελάνωση.....	44
3.4.3 Αναλυτική περιγραφή σταδίων παραγωγής χαρπύ.....	44
3.4.3.1 Προετοιμασία ξύλου.....	45
3.4.3.2 Αφέψηση.....	46
3.4.3.3 Έκπλυση πολτού.....	47
3.4.3.4 Φιλτράρισμα πολτού.....	48
3.4.3.5 Λεύκανση.....	49
3.4.3.6 Προετοιμασία στοκ.....	50
3.4.3.7 Κατασκευή χαρπύ.....	50
3.4.3.7.1 Μηχανή Fourdrinier.....	53
3.4.3.7.2 Κυλινδρική μηχανή.....	55
4 Τα απόβλητα της χαρτοβιομηχανίας.....	56
4.1 Περιβαλλοντικά θέματα της χαρτοβιομηχανίας.....	56
4.2 Ποσότητες παραγόμενων αποβλήτων.....	57
4.3 Αέρια απόβλητα.....	60
4.3.1 Οξειδία του θείου.....	62
4.3.2 Οξειδία του αζώτου.....	62
4.4 Στερεά απόβλητα.....	62
4.4.1 Τέφρα.....	63
4.4.2 Ιλύς.....	66
4.4.2.1 Τα στερεά της ιλύος.....	67
4.4.2.2 Επεξεργασία ιλύος.....	67
4.5 Υγρά απόβλητα.....	67
4.5.1 Χρώμα.....	70
4.5.1.1 Πηγές χρώματος.....	71
5 Τεχνικές πρόληψης ρύπανσης.....	72
5.1 Εισαγωγή.....	72
5.2 Ανακύκλωση και ανάκτηση πρώτων υλών.....	73

5.2.1 Σύστημα ανάκτησης χημικών ουσιών.....	74
5.2.1.1 Εξάτμιση.....	75
5.2.1.2 Καύση του μαύρου διαλύματος στο λέβητα ανάκτησης.....	76
5.2.1.3 Καύση.....	77
5.2.1.4 Μετατροπή του ασβεστόλιθου CaCO_3 σε οξείδιο του ασβεστίου CaO.....	78
5.2.2 Διεργασίες ανάκτησης πρώτων υλών.....	78
5.2.2.1 Φιλτράρισμα για ανάκτηση πρώτων υλών.....	80
5.2.2.2 Επίπλευση για ανάκτηση πρώτων υλών.....	81
5.2.3 Σύστημα λευκού νερού.....	84
5.2.3.1 Σύνθεση λευκού νερού.....	86
5.2.4 Κλειστά συστήματα.....	87
5.2.4.1 Προβλήματα κλειστών συστημάτων.....	88
5.2.4.1.1 Ανάπτυξη μικροβίων.....	88
5.2.4.1.2 Διάβρωση.....	89
5.2.4.1.3 Εκρήξεις.....	89
5.2.4.2 Αντιμετώπιση των προβλημάτων.....	89
5.2.4.2.1 Βιοκτόνα.....	89
5.2.4.2.2 Εξάτμιση.....	90
5.3 Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές.....	90
5.3.1 Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές για την ελαχιστοποίηση αέριων αποβλήτων.....	90
5.3.1.1 Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές για την ελαχιστοποίηση διοξινών και φουρανών.....	91
5.3.1.2 Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές για ελαχιστοποίηση οξειδίων του αζώτου.....	92
5.3.1.3 Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές για ελαχιστοποίηση διοξειδίου του θείου.....	92
5.3.1.4 Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές για ελαχιστοποίηση μονοξειδίου του άνθρακα (CO).....	93
5.3.1.5 Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές για ελαχιστοποίηση ανηγμένων θειικών ενώσεων (TRS).....	93
5.3.1.5.1 Οξειδωση μαύρου διαλύματος.....	93
5.3.1.5.2 Λέβητες ανάκτησης χαμηλής οσμής.....	93
5.3.1.5.3 Κανονική λειτουργία του φούρνου ανάκτησης.....	94
5.3.2 Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές για την ελαχιστοποίησης ιλύος.....	94

5.3.2.1 Εκτεταμένος αερισμός.....	94
5.3.2.2 Βελτιωμένος αερισμός.....	94
5.3.2.3 Προσθετικά.....	95
5.3.3 Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές για την ελαχιστοποίηση υγρών αποβλήτων.....	95
5.3.3.1 Ξηρή αποφλοίωση.....	95
5.3.3.2 Βελτιστοποίηση συνθηκών βρασμού.....	96
5.3.3.3 Εκτεταμένη απολιγνίνωση.....	96
5.3.3.4 Απολιγνίνωση με οξυγόνο.....	97
5.3.3.5 Βελτιωμένη λεύκανση.....	100
5.3.3.5.1 ECF λεύκανση.....	100
5.3.3.5.2 TCF λεύκανση.....	102
5.3.3.6 Βιομηχανική βιοτεχνολογία.....	103
5.3.3.6.1 Ένζυμο ξυλανάσης.....	104
5.3.3.6.2 Μύκητες λευκής σήψης.....	104
6 Τεχνικές επεξεργασίας αποβλήτων.....	106
6.1 Εισαγωγή.....	106
6.2 Στάδια επεξεργασίας αποβλήτων.....	106
6.2.1 Προεπεξεργασία.....	107
6.2.1.1 Υπέρηχοι.....	107
6.2.1.2 Θερμική επεξεργασία.....	107
6.2.1.3 Οξειδωση με όζον.....	108
6.2.1.4 Μηχανική διάσπαση με σπηλαιώση.....	108
6.2.1.5 Μηχανική επεξεργασία.....	108
6.2.1.6 Εφαρμογή κενού.....	108
6.2.2 Πρωτοβάθμια – φυσική επεξεργασία.....	109
6.2.3 Δευτεροβάθμια – βιολογική επεξεργασία.....	110
6.2.4 Τριτοβάθμια – φυσικοχημική επεξεργασία.....	111
6.3 Τεχνικές επεξεργασίας αέριων αποβλήτων.....	112
6.3.1 Τεχνικές αντιμετώπισης τέφρας και σκόνης.....	112
6.3.1.1 Ηλεκτροστατικός διαχωριστής.....	112
6.3.1.2 Υφασματόφιλτρα (ή Σακόφιλτρα).....	114
6.3.1.3 Φυγοκεντρικοί συλλέκτες.....	116
6.3.1.3.1 Δυναμικοί διαχωριστές.....	118

6.3.1.3.2 Κυκλώνες.....	118
6.3.2 Τεχνικές αντιμετώπισης διοξειδίου του θείου (SO ₂).....	120
6.3.2.1 Ξηρές διαδικασίες.....	120
6.3.2.2 Ημίξηρες διαδικασίες.....	121
6.3.2.3 Υγρές διαδικασίες.....	121
6.3.3 Τεχνικές αντιμετώπισης οξειδίων του αζώτου (NO _x).....	122
6.4 Τεχνικές επεξεργασίας στερεών αποβλήτων.....	122
6.4.1 Αποτέφρωση.....	123
6.4.2 Αεριοποίηση.....	124
6.4.3 Πυρόλυση.....	126
6.4.4 Κομποστοποίηση (Αερόβια αποσύνθεση).....	127
6.4.5 Αναερόβια χώνευση.....	128
6.4.6 Απόθεση στερεών αποβλήτων σε χωματερή.....	131
6.4.6.1 Περιβαλλοντικός αντίκτυπος.....	132
6.5 Μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.....	132
6.5.1 Συστήματα φυσικού καθαρισμού.....	134
6.5.1.1 Καθίζηση.....	135
6.5.1.2 Επίπλευση.....	135
6.5.2 Συστήματα βιολογικού καθαρισμού.....	136
6.5.2.1 Επεξεργασία ιλύος.....	136
6.5.2.2 Αναερόβια αποσύνθεση λυμάτων σταθμού χαρτιού.....	136
6.5.2.2.1 Εισαγωγή στην αναερόβια αποσύνθεση.....	137
6.5.2.2.3 Αναερόβια βιοαποδομησιμότητα λυμάτων.....	139
6.5.2.2.4 1 ^η μέθοδος αναερόβιας αποσύνθεσης (διαδοχικός αντιδραστήρας).....	139
6.5.2.2.5 2 ^η μέθοδος αναερόβιας αποσύνθεσης (UASB αντιδραστήρας).....	141
6.5.2.3 Αερόβια αποσύνθεση υγρών αποβλήτων.....	143
6.5.2.3.1 Αεριζόμενες λεκάνες (Λεκάνες σταθεροποίησης).....	143
6.5.2.3.2 Αερόβιο βιολογικό φίλτρο.....	143
6.5.2.3.3 Διασταλλαγματικό φίλτρο.....	150
6.5.2.3.4 Περιστρεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι (Rotating Biological Contactors – RBCs).....	152
6.5.2.3.5 Βιοφίλτρο ανοδικού αέρα με μέσα άμμου.....	153
6.5.2.3.6 Εμβαπτιζόμενο βιολογικό αεριζόμενο φίλτρο.....	155
6.5.2.3.7 Διεργασία ενεργούς ιλύος.....	159

6.5.2.3.8 Μεσοφιλική και θερμοφιλική βιολογική επεξεργασία.....	160
6.5.3 Συστήματα φυσικοχημικού καθαρισμού.....	161
6.5.3.1 Προηγμένη οξειδωση υγρών αποβλήτων με φωτοκατάλυση με διοξείδιο του τιτανίου (TiO ₂).....	161
6.5.3.2 Ετερογενής φωτοκατάλυση και όζον.....	167
6.5.3.3 Ηλιακή φωτοκατάλυση.....	169
6.5.3.4 Προσρόφηση.....	170
6.5.3.5 Διεργασίες με μεμβράνες.....	171
6.5.3.6 Αφαίρεση χρώματος με χημική οξειδωση.....	172
6.5.3.7 Χημική επεξεργασία (Καθίζηση / Κροκίδωση).....	173
6.5.4 Ενσωματωμένα / Υβριδικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.....	173
6.5.4.1 Οζονισμός συνδυασμένος με βιολογική επεξεργασία.....	178
6.5.4.2 Βιολογική προ – επεξεργασία συνδυασμένη με οζονισμό και με μία δεύτερη βιολογική επεξεργασία.....	179
6.5.4.3 Υπερδιήθηση συνδυασμένη με οζονισμό και βιολογική επεξεργασία.....	180
6.5.4.4 Νανοφιλτράρισμα και οξειδωση.....	180
6.5.4.5 Βιο – φυσικο – χημική επεξεργασία για την αφαίρεση χρώματος.....	181
6.6. Κόστος και απόδοση συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων.....	181
6.7. Κόστος και απόδοση συστημάτων επεξεργασίας αέριων αποβλήτων.....	186
7 Διαχείριση της ιλύος από την επεξεργασία των αποβλήτων της χαρτοβιομηχανίας.....	187
7.1 Εισαγωγή.....	187
7.2 Ωφέλιμες χρήσεις ιλύος.....	187
7.2.1 Παραγωγή κεραμικών και υλικών κατασκευών.....	188
7.2.2 Πελλετοποίηση.....	189
7.2.3 Κομποστοποίηση.....	189
7.2.4 Παραγωγή αιθανόλης.....	190
7.2.5 Παραγωγή ζωικών τροφών.....	190
7.3 Τέφρα.....	190
8 Συμπέρασμα και μελλοντικές προτάσεις και έρευνα.....	193
Βιβλιογραφία.....	195

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1. Το παλαιότερο βιβλίο από το 250πΧ.....	32
Εικόνα 2.2 Ο μύλος χαρτιού στη Νυρεμβέργη, το κτίριο στην κάτω δεξιά γωνία, το 1493.....	33
Εικόνα 2.3 Η χαρτομηχανή όπως κατασκευάστηκε από τους Bryan Donkin και τους αδερφούς Fourdriniers από πατέντα του Nicholas Louis Robert.....	34
Εικόνα 2.4 Εγκαταστάσεις βιομηχανίας χαρτιού.....	35
Εικόνα 2.5 Πανοραμική εικόνα ενός σταθμού χαρτοβιομηχανίας που περιλαμβάνει σταθμό μηχανικής και kraft πολτοποίησης, σταθμό κατασκευής χαρτιού, σταθμό ενέργειας και σταθμό επεξεργασίας αποβλήτων.....	40
Εικόνα 2.6 Στοιβα από πριονίδια.....	46
Εικόνα 2.7 Βαθμός αφαίρεσης χρώματος στον πολτό.....	49
Εικόνα 2.8 Κυβέτες χαρτιού που χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη.....	51
Εικόνα 2.9 Ρολοποιητική μηχανή χαρτιού.....	51
Εικόνα 2.10 Μηχανή περιτύλιξης χαρτιού.....	51
Εικόνα 2.11 Πρώτη ύλη στη δεύτερη μέθοδο παραγωγής χαρτιού.....	52
Εικόνα 5.1 Κεραμικό υλικό ως υλικό στήριξης.....	156
Εικόνα 5.2 Πιλοτικό ηλιακό σύστημα για επεξεργασία λυμάτων.....	169
Εικόνα 6.1 Τούβλο μετά από προσθήκη ιλύος.....	189

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 1.1 Θάνατοι από ρύπανση ατμόσφαιρας.....	27
Σχήμα 1.2 Ανακεφαλαίωση δραστηριοτήτων που προκαλούν ρύπανση των εδαφών στην Ευρώπη.....	28
Σχήμα 2.1 Επίπεδα παραγωγής και εκπομπών ευρωπαϊκής βιομηχανίας πολτού και χάρτου.....	30
Σχήμα 2.2 Διάγραμμα εισόδων – εξόδων για παραγωγή χαρτιού.....	31
Σχήμα 2.3 Αριθμός μύλων πολτού ανά όγκο στην Ευρώπη από 1998 - 2008.....	35
Σχήμα 2.4 Είδη χαρτιού και ποσοστά παραγωγής τους.....	36
Σχήμα 2.5 Ποσότητα ινών που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή χαρτιού.....	37
Σχήμα 2.6 Αντιπροσωπευτική μηχανή άλεσης.....	39
Σχήμα 2.7 Παραγωγή μηχανικού πολτού.....	39
Σχήμα 2.8 Στάδια χημικής πολτοποίησης kraft.....	41
Σχήμα 2.9 Ημιχημική πολτοποίηση.....	42
Σχήμα 2.10 Παραγωγή από ανακυκλωμένο χαρτί.....	42
Σχήμα 2.11 Γραμμή παραγωγής πολτού από ανακυκλωμένο χαρτί.....	43
Σχήμα 2.12 Ρυθμός συλλογής και χρησιμοποίησης ανακυκλωμένου χαρτιού.....	43
Σχήμα 2.13 Βήματα διεργασίας κατασκευής χαρτιού.....	45
Σχήμα 2.14 Διάγραμμα ροής προετοιμασίας ξύλου.....	45
Σχήμα 2.15 Συνεχής χωνευτής.....	47
Σχήμα 2.16 Σύστημα έκπλυσης με περιστροφικές πλυντρίδες.....	48
Σχήμα 2.17 Μηχανή απομάκρυνσης ινών με κόμπους.....	48
Σχήμα 2.18 Λεύκανση.....	49
Σχήμα 2.19 Μηχανή χάρτου.....	50
Σχήμα 2.20 Διαδικασία παραγωγής χαρτιού με την πρώτη μέθοδο.....	52
Σχήμα 2.21 Διαδικασία παραγωγής χαρτιού με τη δεύτερη μέθοδο.....	53
Σχήμα 2.22 Διάγραμμα ροής – Αρχή Fourdrinier.....	54
Σχήμα 2.23 Μηχανή Fourdrinier.....	55
Σχήμα 2.24 Κυλινδρική μηχανή.....	55
Σχήμα 3.1 Μέση τιμή εκκενώσεων αποβλήτων ανά χρόνο από βιομηχανία πολτού και χάρτου.....	56
Σχήμα 3.2 Κύριο σχήμα παραγωγής εκπομπών από την παραγωγή πολτού.....	58
Σχήμα 3.3 Κύριο σχήμα παραγωγής εκπομπών από την παραγωγή χαρτιού.....	59
Σχήμα 3.4 Εισροές και εκροές σε βιομηχανία χάρτου.....	60
Σχήμα 3.5 Πηγές τέφρας.....	63
Σχήμα 3.6 Σύγκριση συγκεντρώσεων διοξινών και φουρανών σε ιπτάμενη τέφρα από την καύση ξύλου σε παράκτιους μύλους και της ενδοχώρας.....	65
Σχήμα 3.7 Επεξεργασία υγρών αποβλήτων.....	66
Σχήμα 4.1 Βελτιστοποίηση κόστους τεχνολογιών επεξεργασίας.....	73
Σχήμα 4.2 Χρήση ανακτώμενου χαρτιού στη χαρτοβιομηχανία.....	73
Σχήμα 4.3 Αναπαράσταση των χημικών διεργασιών που εκτελούνται κατά τη χημική πολτοποίηση.....	74
Σχήμα 4.4 Διαλύματα που ανακυκλώνονται και επαναχρησιμοποιούνται από τη kraft πολτοποίηση.....	75
Σχήμα 4.5 Τυπικό σχήμα μοντέρνου λέβητα ανάκτησης.....	76
Σχήμα 4.6 Διεργασία ανακτώμενων ινών.....	79
Σχήμα 4.7 Σχεδιάγραμμα μονάδας επίπλευσης.....	81

Σχήμα 4.8	Είδος επίπλευσης με συμπίεση πλήρους ροής.....	82
Σχήμα 4.9	Είδος επίπλευσης με συμπίεση μερικής ροής.....	83
Σχήμα 4.10	Είδος επίπλευσης με συμπίεση ανακύκλωσης ροής.....	84
Σχήμα 4.11	Διάγραμμα ανακύκλωσης ροής.....	85
Σχήμα 4.12	Μικρή κυκλοφορία νερού στη χαρτομηχανή.....	86
Σχήμα 4.13	Μεγάλη κυκλοφορία νερού στη χαρτομηχανή.....	86
Σχήμα 4.14	Χρήση νερού και επαναχρησιμοποίηση σε μύλους πολτού και χάρτου.....	88
Σχήμα 4.15	Μείωση στην εκπομπή αέριων ρύπων.....	91
Σχήμα 4.16	Μείωση διοξειδίων και φουρανών αυξάνοντας την αντικατάσταση χλωρίου με διοξείδιο του χλωρίου.....	92
Σχήμα 4.17	Διάγραμμα εξαεριστή Venturi.....	95
Σχήμα 4.18	Απολιγνίνωση με οξυγόνο και έκπλυση.....	97
Σχήμα 4.19	Απολιγνίνωση με οξυγόνο ενός σταδίου.....	98
Σχήμα 4.20	Απολιγνίνωση με οξυγόνο δύο σταδίων.....	98
Σχήμα 4.21	Οι ΑΟΧ μειώνονται γραμμικά με τη μείωση της περιεκτικότητας του πολτού σε λιγνίνη.....	99
Σχήμα 4.22	Παγκόσμια χωρητικότητα παραγωγής πολτού απολιγνινωμένου με οξυγόνο.....	99
Σχήμα 4.23	Λεύκανση ECF με όζον και παραδοσιακή λεύκανση ECF.....	101
Σχήμα 4.24	Καθώς μειώνεται η χρήση του ατομικού χλωρίου στη λεύκανση, οι συγκεντρώσεις των ΑΟΧ στα απόβλητα μειώνονται με σχεδόν γραμμικό τρόπο.....	102
Σχήμα 4.25	Ροές αποβλήτων για διεργασίες λεύκανσης πολτού.....	102
Σχήμα 4.26	Τάσεις στη λεύκανση πολτού.....	103
Σχήμα 4.27	Εκπομπές χλωριωμένων ενώσεων.....	103
Σχήμα 4.28	Μείωση χλωρίου στα απόβλητα με μέθοδο βιοτεχνολογίας.....	104
Σχήμα 4.29	Μείωση κατανάλωσης ενέργειας στην παραγωγή πολτού με μία διεργασία βιοτεχνολογίας.....	105
Σχήμα 5.1	Τυπικό διάγραμμα επεξεργασίας αποβλήτων σταθμού χάρτου.....	106
Σχήμα 5.2	Εγκάρσια τομή ομογενοποιητή υψηλής πίεσης.....	108
Σχήμα 5.3	Σχηματικό διάγραμμα αντιδραστήρα κενού.....	109
Σχήμα 5.4	Επιρροή κυτταρικής διάσπασης στα χαρακτηριστικά καθίζησης της ιλύος.....	109
Σχήμα 5.5	Παραδειγματική παρουσίαση της μείωσης των BOD και COD μετά τη βιολογική επεξεργασία.....	111
Σχήμα 5.6	Γενική μορφή και θέση εγκατάστασης Η / Φ.....	113
Σχήμα 5.7	Βαθμός απόδοσης Η / Φ συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων.....	113
Σχήμα 5.8	Γειωμένη επίπεδη πλάκα συλλογής.....	114
Σχήμα 5.9	Γενική διάταξη υφασματοφίλτρου.....	115
Σχήμα 5.10	Τυπική διάταξη φυγοκεντρικού συλλέκτη.....	117
Σχήμα 5.11	Τυπική διάταξη αδρανειακού συλλέκτη.....	117
Σχήμα 5.12	Σύγκριση μεγέθους συμπαγούς διαχωριστή και τυπικού κυκλώνα.....	118
Σχήμα 5.13	Τύποι κυκλώνων.....	119
Σχήμα 5.14	Πλυντρίδα τύπου Venturi.....	120
Σχήμα 5.15	Διάταξη υγρής αποθείωσης.....	121
Σχήμα 5.16	Σχεδιάγραμμα επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής – SCR.....	122
Σχήμα 5.17	Στατική ρευστοποιημένη κλίνη.....	124
Σχήμα 5.18	Οι κυριότεροι αντιδραστήρες αερίου – στερεού σύμφωνα με την ταχύτητα περιρροής.....	125
Σχήμα 5.19	Πυρόλυση σε περιστρεφόμενο κλίβανο.....	127
Σχήμα 5.20	Σχηματική ανακεφαλαίωση παραγωγής ιλύος και παραγωγής βιοαερίου.....	128

Σχήμα 5.21 Διεργασία θερμικής υδρόλυσης.....	129
Σχήμα 5.22 Σχηματική διεργασίας συστήματος οζονισμού.....	131
Σχήμα 5.23 Εξωτερική επεξεργασία υγρών αποβλήτων σε στάδια.....	132
Σχήμα 5.24 Ποσοστό μείωσης των συνολικά αιωρούμενων σωματιδίων μέσω καθίζησης.....	135
Σχήμα 5.25 Μείωση BOD λόγω καθίζησης	135
Σχήμα 5.26 Αριθμός λειτουργικών αναερόβιων αντιδραστήρων στη βιομηχανία πολτού και χάρτου.....	137
Σχήμα 5.27 Ποσοστά χρήσης διάφορων αναερόβιων αντιδραστήρων στη βιομηχανία πολτού και χάρτου.....	139
Σχήμα 5.28 Μείωση COD (%).....	140
Σχήμα 5.29 Το pH σε σχέση με το χρόνο.....	141
Σχήμα 5.30 Απόπλυση ιλύος (περιεκτικότητα σε CO ₂) από τον αντιδραστήρα.....	141
Σχήμα 5.31 Γενική διάταξη αντιδραστήρα.....	142
Σχήμα 5.32 Αναλυτική διάταξη αντιδραστήρα.....	142
Σχήμα 5.33 Διάφοροι φορείς που χρησιμοποιούνται στη διεργασία βιοφίλτρου.....	144
Σχήμα 5.34 Σχηματικό διάγραμμα εγκατάστασης βιολογικού φίλτρου.....	145
Σχήμα 5.35 Διαμόρφωση επιφάνειας βιοφίλμ μετά από ανάπτυξη 48h.....	145
Σχήμα 5.36 Συγκέντρωση COD σε εισερχόμενα και εξερχόμενα απόβλητα για θερμοκρασίες 17 -19.5 °C.....	146
Σχήμα 5.37 Συγκέντρωση COD σε εισερχόμενα και εξερχόμενα απόβλητα για θερμοκρασίες 25.2 – 27 °C.....	146
Σχήμα 5.38 Συγκέντρωση COD σε εισερχόμενα και εξερχόμενα απόβλητα για θερμοκρασίες 31 – 33 °C.....	147
Σχήμα 5.39 Συγκέντρωση COD σε εισερχόμενα και εξερχόμενα απόβλητα στο βιοφίλτρο για διαφορετική θερμοκρασία.....	147
Σχήμα 5.40 Συγκέντρωση COD σε εισερχόμενα και εξερχόμενα απόβλητα στο βιοφίλτρο για διαφορετικό pH.....	149
Σχήμα 5.41 Συγκέντρωση COD σε εισερχόμενα και εξερχόμενα απόβλητα στο βιοφίλτρο για διαφορετικό ρυθμό επανακυκλοφορίας.....	150
Σχήμα 5.42 Βιολογικό διασταλλαγματικό φίλτρο.....	151
Σχήμα 5.43 (Α) Διάταξη μιας μονάδας RBC. Παρουσιάζεται η δημιουργία του βιοφίλμ και του στρώματος του υγρού (Β) Διαφορετικού τύπου προσκολλητικά μέσα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε RBCs.....	153
Σχήμα 5.44 Σχηματικό διάγραμμα του UABF φίλτρου.....	154
Σχήμα 5.45 Συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών στα απόβλητα για κάθε δοκιμή.....	155
Σχήμα 5.46 Σχηματικό διάγραμμα βιοφίλτρου.....	156
Σχήμα 5.47 Σχέση συγκέντρωσης BOD εξερχόμενων αποβλήτων με εισερχόμενων όσον αφορά το ύψος στρώματος υλικού.....	157
Σχήμα 5.48 Σχέση συγκέντρωσης αιωρούμενων στερεών εξερχόμενων αποβλήτων με εισερχόμενων ανάλογα το ύψος στρώματος υλικού.....	158
Σχήμα 5.49 Σχέση κατανάλωσης αζωγόνου με το εφαρμοζόμενο ογκομετρικό φορτίο BOD σε εισερχόμενα απόβλητα ανάλογα το ύψος στρώματος υλικού.....	158
Σχήμα 5.50 Πλήρης διεργασία ενεργούς ιλύος.....	159
Σχήμα 5.51 Προανοξυγονική διεργασία για βιολογική αφαίρεση αζώτου.....	160
Σχήμα 5.52 Διάγραμμα ροής και διεργασία λεύκανσης πολτού.....	163
Σχήμα 5.53 Φωτοαντιδραστήρας για προηγμένη οξείδωση λευκασμένων λυμάτων.....	164
Σχήμα 5.54 Αλλαγή στο λόγο BOD / COD για τα στάδια D ₁ και E για τις ακολουθίες DED	

και ODED.....	164
Σχήμα 5.55 Αφαίρεση COD (%) για τα στάδια D ₁ και E για τις ακολουθίες DED και ODED.....	165
Σχήμα 5.56 Αφαίρεση BOD (%) για τα στάδια D ₁ και E για τις ακολουθίες DED και ODED.....	166
Σχήμα 5.57 Αφαίρεση χρώματος για τα στάδια D ₁ και E για τις ακολουθίες DED και ODED.....	166
Σχήμα 5.58 Αφαίρεση AOX (%) για τα στάδια D ₁ και E για τις ακολουθίες DED και ODED.....	167
Σχήμα 5.59 Μείωση ολικού οργανικού άνθρακα με τη συμβατική φωτοκατάλυση.....	167
Σχήμα 5.60 Μείωση του ολικού οργανικού άνθρακα για συνδυασμό φωτοκατάλυσης και οζονισμού.....	168
Σχήμα 5.61 Μείωση COD με ηλιακή φωτοκατάλυση και αντιδραστήριο Fenton.....	170
Σχήμα 5.62 Μείωση COD με ηλιακή φωτοκατάλυση και καταλύτη διοξειδίου τιτανίου.....	170
Σχήμα 5.63 Διαφορετικές τεχνολογίες φιλτραρίσματος με μεμβράνες.....	171
Σχήμα 5.64 Παράδειγμα ενός συστήματος ανάκτησης με υπερδιήθηση για την αφαίρεση χρώματος.....	172
Σχήμα 5.65 Διάγραμμα τυπικής εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων με τη μέθοδο της ενεργούς ιλύος.....	174
Σχήμα 5.66 Αναερόβιος αντιδραστήρας σε συνδυασμό με σύστημα ενεργούς ιλύος.....	175
Σχήμα 5.67 Αερόβιος αντιδραστήρας δύο σταδίων με σύστημα ενεργούς ιλύος.....	176
Σχήμα 5.68 Σύστημα αερόβιου βιοφίλτρου δύο σταδίων συνδυασμένο με σύστημα ενεργούς ιλύος.....	176
Σχήμα 5.69 Αλλαγές στο χρώμα, λιγνίνη, COD, AOX και φαινόλες μετά την αναερόβια επεξεργασία.....	177
Σχήμα 5.70 Αλλαγές στο χρώμα, λιγνίνη, COD, AOX και φαινόλες μετά την αερόβια επεξεργασία.....	177
Σχήμα 5.71 Σχηματικό διάγραμμα επεξεργασίας οζονισμού συνδυασμένου με βιολογική επεξεργασία.....	178
Σχήμα 5.72 Μείωση οργανικών ενώσεων με την επεξεργασία οζονισμού συνδυασμένου με βιολογική επεξεργασία.....	178
Σχήμα 5.73 Σχηματικό διάγραμμα επεξεργασίας οζονισμού συνδυασμένου με δύο στάδια βιολογικής επεξεργασίας.....	179
Σχήμα 5.74 Σχηματική παρουσίαση διεργασίας χημικής – βιοχημικής οξείδωσης λυμάτων μύλου και πολτού.....	179
Σχήμα 5.75 Αποτέλεσμα σταθμού επεξεργασίας λυμάτων δύο σταδίων μετά από διεργασία ενεργούς ιλύος.....	180
Σχήμα 5.76 Σχηματικό διάγραμμα επεξεργασίας υπερδιήθησης συνδυασμένης με οζονισμό και βιολογική επεξεργασία.....	180
Σχήμα 5.77 Διεργασία προ – οζονισμού, νανοφιλτραρίσματος και οξείδωσης.....	181
Σχήμα 5.78 Αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης.....	181
Σχήμα 5.79 Σχέση ανάμεσα σε κόστος και ροή υγρών αποβλήτων.....	181
Σχήμα 5.80 Σύγκριση οικονομικού κόστους λειτουργίας της ενεργούς ιλύος (___), των περιστρεφόμενων βιολογικών δίσκων (___) και διασταλλαγματικών φίλτρων (. . .).....	183
Σχήμα 5.81 Εύρος αφαίρεσης AOX για διάφορα συστήματα επεξεργασίας.....	184
Σχήμα 5.82 Εύρος αφαίρεσης AOX για διάφορους συνδυασμούς συστημάτων επεξεργασίας.....	185

Σχήμα 5.83 Εύρος αφαίρεσης χλωροφαινολών για διάφορα συστήματα επεξεργασίας.....	185
Σχήμα 6.1 Εφαρμογές των υπολειμμάτων της βιομηχανίας πολτού και χάρτου.....	187
Σχήμα 6.2 Χρήση ιλύος.....	188
Σχήμα 6.3 Χρήσεις τέφρας.....	191

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1.1 Κατάλογος ρυπογόνων ουσιών για την ατμόσφαιρα και τα ύδατα.....	26
Πίνακας 2.1 Σύνθεση ινών.....	34
Πίνακας 2.2 Είδος φυτού για την παραγωγή κυτταρίνης.....	37
Πίνακας 3.1 Συνηθισμένοι αέριοι ρύποι από διεργασίες πολτού και χάρτου.....	60
Πίνακας 3.2 Σύγκριση ταφρών που προκύπτουν από την καύση ξύλου / φλοιού με αυτές από την καύση υπολειμμάτων πολτού και χάρτου.....	64
Πίνακας 3.3 Συνηθισμένα υγρά απόβλητα από διεργασίες πολτού και χάρτου.....	68
Πίνακας 3.4 Τυπικά φορτία λυμάτων από διαφορετικούς μύλους πριν την εξωτερική επεξεργασία.....	69
Πίνακας 4.1 Τυπική σύνθεση μαύρου διαλύματος.....	75
Πίνακας 4.2 Εκτίμηση κατανάλωσης νερού για παραγωγή χαρτιού.....	85
Πίνακας 4.3 Σύνθεση λευκού νερού σε μύλο ανακυκλωμένου χαρτιού.....	87
Πίνακας 4.4 Επίπεδα εκπομπών που ορίζονται από ΕΕ με τη χρήση BATs σε μύλους χαρτιού.....	90
Πίνακας 4.5 Φορτίο ρύπανσης αποβλήτων υγρής και ξηρής αποφλοίωσης πριν από επεξεργασία.....	96
Πίνακας 4.6 Μείωση ενώσεων ΑΟΧ από εκτεταμένη απολιγνίνωση.....	97
Πίνακας 5.1 Χαρακτηριστικά αποβλήτων σταθμού χάρτου.....	107
Πίνακας 5.2 Τεχνικές ελέγχου για συγκεκριμένες παραμέτρους αέριων εκπομπών.....	112
Πίνακας 5.3 Σύγκριση σεναρίων επεξεργασίας στερεών αποβλήτων με ή χωρίς τη θερμική υδρόλυση.....	130
Πίνακας 5.4 Τα διάφορα στάδια της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων.....	134
Πίνακας 5.5 Μείωση COD στο βιοφίλτρο για διαφορετική θερμοκρασία.....	148
Πίνακας 5.6 Μείωση COD στο βιοφίλτρο για διαφορετικό pH.....	148
Πίνακας 5.7 Μείωση COD στο βιοφίλτρο για διαφορετικό ρυθμό επανακυκλοφορίας.....	149
Πίνακας 5.8 Μέσα χημικά χαρακτηριστικά των λυμάτων πριν την επεξεργασία.....	151
Πίνακας 5.9 Μέσα χημικά χαρακτηριστικά των λυμάτων μετά την πρωτοβάθμια επεξεργασία.....	152
Πίνακας 5.10 Μέσα χημικά χαρακτηριστικά των λυμάτων κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία, τα δύο πρώτα στάδια του φίλτρου και η συνολική τους μείωση.....	152
Πίνακας 5.11 Χαρακτηριστικά απόδοσης φίλτρου UABF.....	154
Πίνακας 5.12 Συνθήκες λεύκανσης πολτού για διάφορα στάδια.....	162
Πίνακας 5.13 Χαρακτηριστικά των λυμάτων λεύκανσης.....	165
Πίνακας 5.14 Μείωση των ΑΟΧ και COD για διάφορες τεχνικές στα λύματα λεύκανσης.....	169
Πίνακας 5.15 Χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων.....	182
Πίνακας 5.16 Κόστη συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων σε ECU / m ³	182
Πίνακας 5.17 Παράδειγμα αποτελεσματικότητας μείωσης για διάφορες επεξεργασίες υγρών αποβλήτων.....	183
Πίνακας 5.18 Απόδοση διαφορετικών αντιδραστήρων.....	184
Πίνακας 5.19 Απόδοση και κόστος τεχνικών ελέγχου αέριων εκπομπών.....	184

Κατάλογος Συμβόλων

Σύμβολο	Επεξήγηση
ΠΔΟ	προηγμένες διεργασίες οξείδωσης
Al	aluminum – αλουμίνιο
Al ₂ O ₃	aluminum oxide – οξείδιο του αργιλίου
AOX	adsorbable organic halogen compounds – οργανοαλογομένες ενώσεις
BAF	biological aerated filter – αεριζόμενο βιοφίλτρο
BATs	best available techniques – βέλτιστες διαθέσιμες τεχνικές
BOD	biochemical oxygen demand – βιοχημική απαίτηση οξυγόνου
C	carbon - άνθρακας
Ca	calcium - ασβέστιο
CaCO ₃	calcium carbonate – ανθρακικό ασβέστιο
CaO	calcium oxide - οξείδιο του ασβεστίου
Ca(OH) ₂	calcium hydroxide – υδροξείδιο του ασβεστίου
Cd	cadmium - κάδμιο
CH ₄	methane - μεθάνιο
ClO ₂	chlorine dioxide – διοξείδιο του χλωρίου
Cl ₂	chlorine - χλώριο
CO	carbon monoxide – μονοξείδιο του άνθρακα
CO ₂	carbon dioxide - διοξείδιο του άνθρακα
COD	chemical oxygen demand – χημική απαίτηση οξυγόνου
CTMP	chemothermomechanical pulp – χημικοθερμομηχανικός πολτός
DABF	down flow aerobic filter – φίλτρο καθοδικού ρεύματος αέρα
DS	diluted solids – διαλυμένα στερεά
ECF	elemental chlorine free – ελεύθερο από χλώριο
Fe	iron - σίδηρος
Fe ₂ O ₃	iron oxide – οξείδιο του σιδήρου
H ₂	hydrogen - υδρογόνο
HCl	hydrogen chloride – υδροχλωρικό οξύ
H ₂ CO ₃	carbonic acid – ανθρακικό οξύ
HF	hydrogen fluoride – υδροφθορικό οξύ
H ₂ O	water – νερό
H ₂ O ₂	hydrogen peroxide - υπεροξείδιο του υδρογόνου
H ₂ S	hydrogen sulfide - υδρόθειο
IPPC	Integrated Prevention Pollution Control - Ολοκληρωμένη πρόληψη και έλεγχος της ρύπανσης
K	kalium - κάλιο
Mg	magnesium - μαγνήσιο
Mn	manganum - μαγγάνιο
N ₂	nitrogen - άζωτο
Na	sodium - νάτριο
NaOH	sodium hydroxide – υδροξείδιο του νατρίου
NaCl	sodium chloride – χλωριούχο νάτριο

Na ₂ CO ₃	sodium carbonate – ανθρακικό νάτριο
Na ₂ O	sodium oxide - οξειδίο του νατρίου
Na ₂ S	sodium sulfide – θειούχο νάτριο
Na ₂ SO ₄	sodium sulfate – θεικό νάτριο
NF	nanaofiltration - νανοφιλτράρισμα
NO	nitrogen monoxide–μονοξειδίο του αζώτου
NO ₂	nitrogen dioxide – διοξειδίο του αζώτου
NO ₃	nitrate – νιτρικό άλας
NO _x	nitrogen oxides – οξειδία του αζώτου
O ₂	oxygen – οξυγόνο
O ₃	ozone - όζον
P	phosphorus - φώσφορος
PO ₄	phosphate – φωσφορικό άλας
P ₂ O ₅	phosphorus pentoxide – πεντοξειδίο του φωσφόρου
RBC	rotating biological contactor – περιστρεφόμενος βιολογικός δίσκος
SiO ₂	silicon dioxide – διοξειδίο του πυριτίου
SO ₂	sulfur dioxide – διοξειδίο του θείου
SO ₃	sulfur trioxide – τριοξειδίο του θείου
SS	suspended solids – αιωρούμενα στερεά
SSF	slow sand filter – φίλτρο άμμου αργής διήθησης
TCF	total chlorine free – εντελώς ελεύθερο από χλώριο
TF	trickling filter – διασταλλαγματικό φίλτρο
TiO ₂	titanium dioxide – διοξειδίο του τιτανίου
TRS	total reduced sulfur compounds – ολικά ανηγμένες θεικέ ενώσεις
TS	total solids – συνολικά στερεά
UABF	up-flow aerated biofilter – βιοφίλτρο με ανοδικό ρεύμα αέρος
UASB	upflow anaerobic sludge blanket - ανοδικής ροής αναερόβιου στρώματος ιλύος
UPVC	unplasticised polyvinyl chloride – μη πλαστικοποιημένο χλωριούχο πολυβινύλιο
UV	ultraviolet - υπεριώδης
VOC	volatile organic compounds – πτητικές οργανικές ενώσεις
Zn	zinc - ψευδάργυρος

1 Εισαγωγή

1.1 Σκοπός Εργασίας

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας αποτελεί η παρουσίαση και η ανάλυση των διεργασιών, τεχνικών και τεχνολογιών επεξεργασίας των αποβλήτων της χαρτοβιομηχανίας. Έτσι αναλύοντας, όλα τα συστατικά μέρη της βιομηχανίας χάρτου και βρίσκοντας τις διεργασίες, οι οποίες παράγουν τα απόβλητα, παρουσιάζονται ανάλογα το είδος των αποβλήτων οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται ή είναι σε στάδιο έρευνας για την αντιμετώπιση τους, είτε ως ελαχιστοποίησή τους ή ως πλήρη εξάλειψη.

1.2 Δομή Εργασίας

Αναλυτικά στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στη θεωρία των βιομηχανικών αποβλήτων. Παρουσιάζονται ορισμοί για την καλύτερη κατανόηση του θέματος, καθώς και το νομικό πλαίσιο που ισχύει γύρω από τα βιομηχανικά απόβλητα. Επίσης, αναφέρονται οι κύριες περιβαλλοντικές απειλές όπως και γίνεται και μία ανάλυση της σύστασης των βιομηχανικών αποβλήτων.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, γίνεται η εισαγωγή στη χαρτοβιομηχανία, αναφέροντας κάποιες εισαγωγικές έννοιες αλλά και κάνοντας μια ιστορική αναδρομή στην πορεία του χαρτιού. Έπειτα, περιγράφονται αναλυτικά όλα τα στάδια κατασκευής χαρτιού.

Στο τρίτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται συγκεκριμένα τα απόβλητα που παράγει μια χαρτοβιομηχανία. Κατηγοριοποιούνται σε αέρια, στερεά και υγρά και αναφέρεται η προέλευσή τους και οι επιπτώσεις τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται κάποιες τεχνικές πρόληψης ρύπανσης για όλα τα απόβλητα που δημιουργεί η χαρτοβιομηχανία με σκοπό την ελαχιστοποίηση τους κατά την παραγωγή τους.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, περιγράφονται οι τεχνικές επεξεργασίας των αποβλήτων, οι οποίες εφαρμόζονται σε τελικό στάδιο μετά τις τεχνικές πρόληψης για την εξάλειψη τους.

Στο έκτο κεφάλαιο, γίνεται μια αναφορά σε κάποιους τρόπους και μεθόδους οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε τα απόβλητα να γίνουν ωφέλιμα.

2 Εισαγωγή στη θεωρία βιομηχανικών αποβλήτων

2.1 Ορισμοί

Η ενασχόληση του μηχανικού με θέματα που άπτονται της τεχνολογίας προστασίας του περιβάλλοντος προϋποθέτει την σωστή κατανόηση της δομής και της λειτουργίας των οικοσυστημάτων.

Περιβάλλον ορίζεται ως το σύνολο εξωτερικών παραγόντων και συνθηκών το οποίο επηρεάζει ζώντες οργανισμούς καθ' οιονδήποτε τρόπο. Το περιβάλλον περιλαμβάνει έμβιες και μη οντότητες.

Οικοσύστημα είναι μία λειτουργούσα μονάδα του περιβάλλοντος η οποία περιλαμβάνει όλους τους ζώντες οργανισμούς, τους φυσικούς παράγοντες, καθώς και τις αλληλοεπιδράσεις των μέσα σε μια ορισμένη γεωγραφική περιοχή-χώρο (π.χ. λίμνη, έρημος, κλπ).

Τα απόβλητα διακρίνονται γενικά σε στερεά, υγρά και αέρια. Στη σχετική νομοθεσία, η οποία αφορά την ίδρυση και λειτουργία βιομηχανικών εγκαταστάσεων, την περιβαλλοντική αδειοδότηση, την ατμοσφαιρική ρύπανση, τα υγρά απόβλητα, τα στερεά και επικίνδυνα απόβλητα, τα καύσιμα κλπ. δίνονται οι ορισμοί των αστικών λυμάτων, των βιομηχανικών αποβλήτων και οδηγίες για τις μεθόδους επεξεργασίας και διαχείρισής τους.

Επεξεργασία των αποβλήτων ονομάζεται κάθε τεχνική χειρισμού, που απομακρύνει ή τροποποιεί κατάλληλα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους ώστε να εξαλείφονται ή ελαττώνονται οι δυσμενείς συνέπειες από τη διάθεσή τους στο περιβάλλον. Η επεξεργασία των αστικών λυμάτων και των βιομηχανικών αποβλήτων έχει σαν στόχο την προστασία όλων των φυσικών αποδεκτών από τη συνεχώς απειλούμενη ρύπανση. Η κατάλληλη μέθοδος επεξεργασίας προϋποθέτει ειδικές γνώσεις αναφορικά με την προέλευση, την ποσότητα και το είδος των αποβλήτων, χαρακτηριστικά που αποτελούν τη βάση του σχεδιασμού μιας εγκατάστασης επεξεργασίας αποβλήτων.

Ρύπανση ονομάζεται η ανεπιθύμητη μεταβολή των ποιοτικών χαρακτηριστικών του νερού (φυσικών, χημικών, ραδιολογικών, βιολογικών - μικροβιολογικών), εξαιτίας κυρίως των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, σε βαθμό που μπορεί να δημιουργηθεί κίνδυνος για την υγεία και να υποβαθμιστεί η ποιότητα ζωής του ανθρώπου. Η ρύπανση προκαλεί βλάβη στα φυσικά οικοσυστήματα και παρεμποδίζει τις επιθυμητές χρήσεις των υδατικών πόρων.

Μόλυνση ονομάζεται η παρουσία στο νερό παθογόνων μικροοργανισμών ή και μικροοργανισμών δεικτών, που υποδηλώνουν τη πιθανότητα παρουσίας παθογόνων, εξαιτίας κυρίως των ανθρώπινων δραστηριοτήτων.

2.2 Το νομικό πλαίσιο για τη βιομηχανία

Η νομοθεσία για τη βιομηχανία στη χώρα μας απαρτίζεται από νόμους, προεδρικά διατάγματα, κοινές υπουργικές αποφάσεις, υπουργικές αποφάσεις, πράξεις υπουργικού συμβουλίου, διανομαρχιακές αποφάσεις και νομαρχιακές αποφάσεις. Το βασικό νομοθετικό πλαίσιο, το οποίο σχετίζεται με περιβαλλοντικά θέματα της βιομηχανίας και αφορά τους εξής τομείς:

- Ίδρυση και λειτουργία βιομηχανικών εγκαταστάσεων
- Περιβαλλοντική αδειοδότηση
- Ατμοσφαιρική ρύπανση
- Υγρά απόβλητα
- Στερεά και επικίνδυνα απόβλητα
- Καύσιμα

- Ατυχήματα, ασφάλεια και υγιεινή των εργαζομένων και ελεύθερη πρόσβαση του κοινού στις δημόσιες αρχές για πληροφορίες σχετικά με το περιβάλλον.

Πέρα από τα παραπάνω, υπάρχει η Ευρωπαϊκή νομοθεσία (πλήθος οδηγιών) που αφορά την βιομηχανία (περιβαλλοντική αδειοδότηση, περιβαλλοντική διαχείριση, ατμοσφαιρική ρύπανση, διαχείριση και επεξεργασία στερεών και επικίνδυνων αποβλήτων, διαχείριση και επεξεργασία υγρών αποβλήτων). Οι περισσότερες από τις οδηγίες αυτές έχουν ενσωματωθεί στην Ελληνική νομοθεσία.

2.2.1 Ειδικότερα για την Οδηγία 96/61/EK (L257/10.10.96)

Η οδηγία 96/61/EK, θεσπίζει το γενικό πλαίσιο για την ολοκληρωμένη πρόληψη και τον έλεγχο της ρύπανσης, εντάσσοντας στο πεδίο εφαρμογής της τις πιο σημαντικές βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Προβλέπει μέτρα αποφυγής και όταν αυτό δεν είναι δυνατόν, μείωσης των εκπομπών στην ατμόσφαιρα, το νερό και το έδαφος και μέτρα για τα απόβλητα, ώστε να επιτευχθεί υψηλό επίπεδο προστασίας του περιβάλλοντος στο σύνολό του. Με την οδηγία πραγματοποιείται υπέρβαση του παραδοσιακού πλαισίου ελέγχου της ρύπανσης από τη στιγμή που ενθαρρύνεται η πρόβλεψη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των εκπομπών, όχι απλώς στο τμήμα του περιβάλλοντος στο οποίο απελευθερώνονται (π.χ. στην ατμόσφαιρα), αλλά εξετάζεται και το ενδεχόμενο οι εν λόγω εκπομπές να προσβάλλουν και άλλα τμήματα του περιβάλλοντος με αρνητικές επιπτώσεις στα νερά και στο έδαφος. Οι βιομηχανικοί κλάδοι που εντάσσονται στην οδηγία καλύπτουν το σύνολο των βιοτεχνικών – βιομηχανικών δραστηριοτήτων που ασκούνται στη χώρα μας.

Η οδηγία 96/61/EK αναφέρεται στην ολοκληρωμένη πρόληψη και τον έλεγχο της ρύπανσης (Integrated Prevention Pollution Control, IPPC) με βάση την πρόγνωση και τη λήψη των αναγκαίων μέτρων, ώστε να επιτευχθεί ένας υψηλός βαθμός προστασίας του περιβάλλοντος. Ουσιαστικά προωθείται ο συνδυασμός της οικονομικής ευημερίας των επιχειρήσεων που εντάσσονται σε αυτήν, με τη μείωση της χρήσης φυσικών πόρων και ενέργειας καθώς και της έκθεσης σε επικίνδυνες ουσίες και εκπομπές κάθε τύπου. Η οδηγία καθορίζει μεταξύ άλλων και την ενιαία περιβαλλοντική αδειοδότηση των πλέον ρυπογόνων βιομηχανιών. Η αδειοδότηση της βιομηχανίας σε ό,τι αφορά το περιβάλλον, στη χώρα μας υλοποιείται μέσω των αποφάσεων έγκρισης περιβαλλοντικών όρων και των αδειών λειτουργίας. Η υλοποίηση της έκδοσης των περιβαλλοντικών όρων (και κατ' επέκταση της αδειοδότησης της βιομηχανίας) στην Ελλάδα γίνεται μέσω της ΥΑ 69269/5387/90 (οδηγία 85/337/ΕΟΚ). Η οδηγία 96/61/EK θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στη διαδικασία αυτή, για τις περισσότερο ρυπογόνες βιομηχανικές μονάδες. Στα πλαίσια αυτά, για την έγκριση των περιβαλλοντικών όρων θα πρέπει η βιομηχανία να περιλαμβάνει στην αίτησή της, ή στην μελέτη περιβαλλοντικών επιπτώσεων τις βέλτιστες διαθέσιμες τεχνικές (BATs), οι οποίες θα καθορίζονται και θα ανανεώνονται σε ευρωπαϊκό επίπεδο. Οι βιομηχανικές μονάδες θα λαμβάνουν άδεια λειτουργίας, στις οποίες θα λαμβάνονται σοβαρά υπόψη οι νέες ρυθμίσεις.

2.3 Οι κύριες περιβαλλοντικές απειλές

Οι κύριες περιβαλλοντικές απειλές θεωρούνται οι εξής:

- Η ρύπανση της ατμόσφαιρας
- Η ρύπανση του εδάφους
- Η ρύπανση των υδάτων

Οι πηγές των ρύπων μπορούν να χωριστούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες: τις ανθρώπινες και τις φυσικές πηγές. Οι ανθρώπινες πηγές, εκείνες δηλαδή που προέρχονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα, είναι και εκείνες που δημιουργούν τις υπερβολικές συγκεντρώσεις ρύπων που προκαλούν τη ρύπανση της ατμόσφαιρας, των υδάτων και του εδάφους.

Οι σημαντικότερες ρυπογόνες ουσίες που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, για τον καθορισμό των οριακών τιμών εκπομπής από βιομηχανικά απόβλητα παρατίθενται στον Πίνακα 1.1.

Πίνακας 1.1. Κατάλογος ρυπογόνων ουσιών για την ατμόσφαιρα και τα ύδατα

Ρυπογόνες ουσίες της ατμόσφαιρας	Ρυπογόνες ουσίες του νερού
<ol style="list-style-type: none"> 1. Διοξείδιο του θείου καθώς και άλλες ενώσεις του θείου 2. Οξειδία του αζώτου καθώς και άλλες ενώσεις του αζώτου 3. Μονοξειδίο του άνθρακα 4. Πτητικές οργανικές ενώσεις (VOCs) 5. Μέταλλα και οι ενώσεις τους 6. Σκόνη 7. Αμίαντος (σωματίδια εν αιωρήσει και ίνες) 8. Χλώριο και ενώσεις του χλωρίου 9. Φθόριο και ενώσεις του φθορίου 10. Αρσενικό και ενώσεις του αρσενικού 11. Κυανιούχες ενώσεις 12. Ουσίες και παρασκευάσματα που έχουν αποδεδειγμένα ιδιότητες καρκινογόνες, μεταλλαξιογόνες, ή ικανές να βλάψουν την αναπαραγωγή μέσω της ατμόσφαιρας 13. Πολυχλωροδιβενζοδιοξίνες και πολυχλωροδιβενζοφουράνια 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Αλογονωμένες οργανικές ουσίες από τις οποίες δύνανται να προκύψουν ανάλογοι είδους ενώσεις μέσα στο υδάτινο περιβάλλον 2. Οργανοφωσφορικές ενώσεις 3. Οργανοκασιτερικές ενώσεις 4. Ουσίες και παρασκευάσματα που έχουν αποδεδειγμένα ιδιότητες καρκινογόνες, μεταλλαξιογόνες ή ικανές να βλάψουν την αναπαραγωγή στο υδάτινο περιβάλλον 5. Ανθεκτικοί υδρογονάνθρακες και ανθεκτικές και βιοσυσσωρευόμενες τοξικές ουσίες 6. Κυανιούχες ενώσεις 7. Μέταλλα και οι ενώσεις τους 8. Αρσενικό και οι ενώσεις του 9. Βιοκτόνα και φυτοϋγειονομικά προϊόντα 10. Αιωρούμενες ουσίες 11. Ουσίες που συμβάλλουν στον ευτροφισμό (ιδίως νιτρικά και φωσφορικά άλατα) 12. Ουσίες που έχουν αρνητική επίδραση στον ισοζύγιο του οξυγόνου (και που μετρούνται με παραμέτρους όπως BOD, COD)

Πηγή: European Commission, Δεκέμβριος 2001

2.3.1 Ρύπανση της ατμόσφαιρας

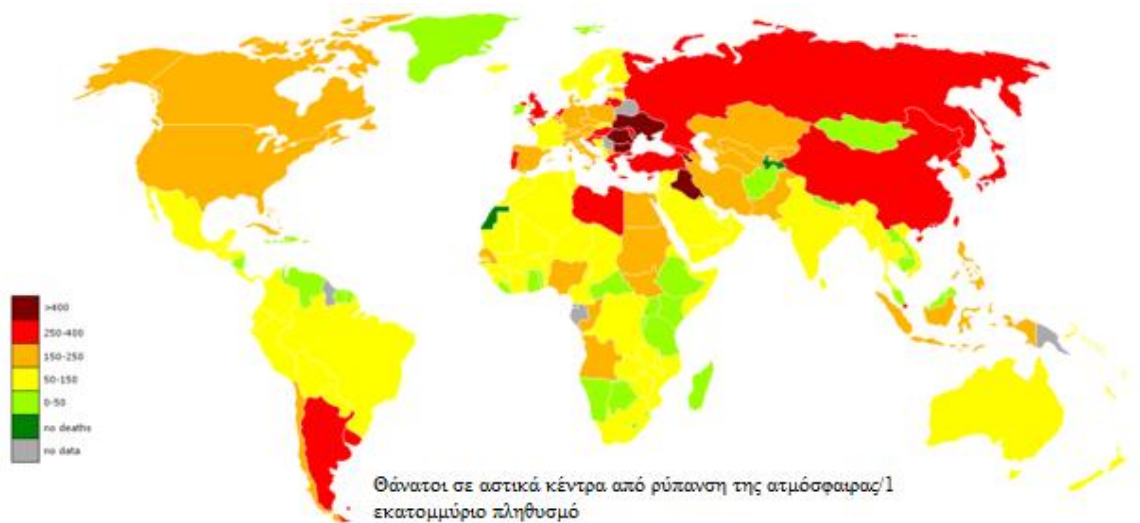
Η ατμόσφαιρα αποτελεί ένα δυναμικό σύμπλεγμα αερίων ουσιώδους σημασίας για τη διατήρηση της ζωής στη Γη. Αέρια που παράγονται από φυσικές και τεχνικές διεργασίες, και μπορούν να βλάψουν το στρώμα του όζοντος στη στρατόσφαιρα ή την ανάπτυξη των έμβιων οργανισμών, ονομάζονται ρύποι.

Μια από τις πιο επικίνδυνες απειλές για την υγεία από αέρος είναι οι «σωματιδιακοί ρύποι» - αυτή είναι η τεχνική ονομασία της σκόνης που βρίσκεται στον αέρα γνωστή και με το ακρωνύμιο sp - των οποίων η διάμετρος μετράται σε εκατομμυριοστά του μέτρου. Τα μικροσκοπικά σωματίδια κάτω των 10 εκατομμυριοστών του μέτρου ή κι ακόμα μικρότερα (PM10 ή μικρότερα) εισέρχονται εύκολα στο αναπνευστικό σύστημα. Διεισδύουν βαθιά στους πνεύμονες και προκαλούν σοβαρές καρδιακές και αναπνευστικές παθήσεις.

Το όζον των κατώτερων στρωμάτων της ατμόσφαιρας ή φωτοχημικό νέφος αποτελεί μια ακόμη απειλή. Ενώ το όζον στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας αποτελεί μια σημαντική ασπίδα προστασίας κατά της επιβλαβούς υπεριώδους ακτινοβολίας, όταν ο άνθρωπος το αναπνέει στην επιφάνεια της γης, ερεθίζει τους αεραγωγούς και βλάπτει τους πνεύμονες, προκαλώντας

βήχα, κρίσεις άσθματος και βακτηριακές λοιμώξεις των πνευμόνων. Επομένως τα υψηλά επίπεδα όζοντος προκαλούν πρόιμο θάνατο σε ανθρώπους που έχουν ευαισθησία (Σχήμα 1.1).

Σχήμα 1.1. Θάνατοι από ρύπανση ατμόσφαιρας



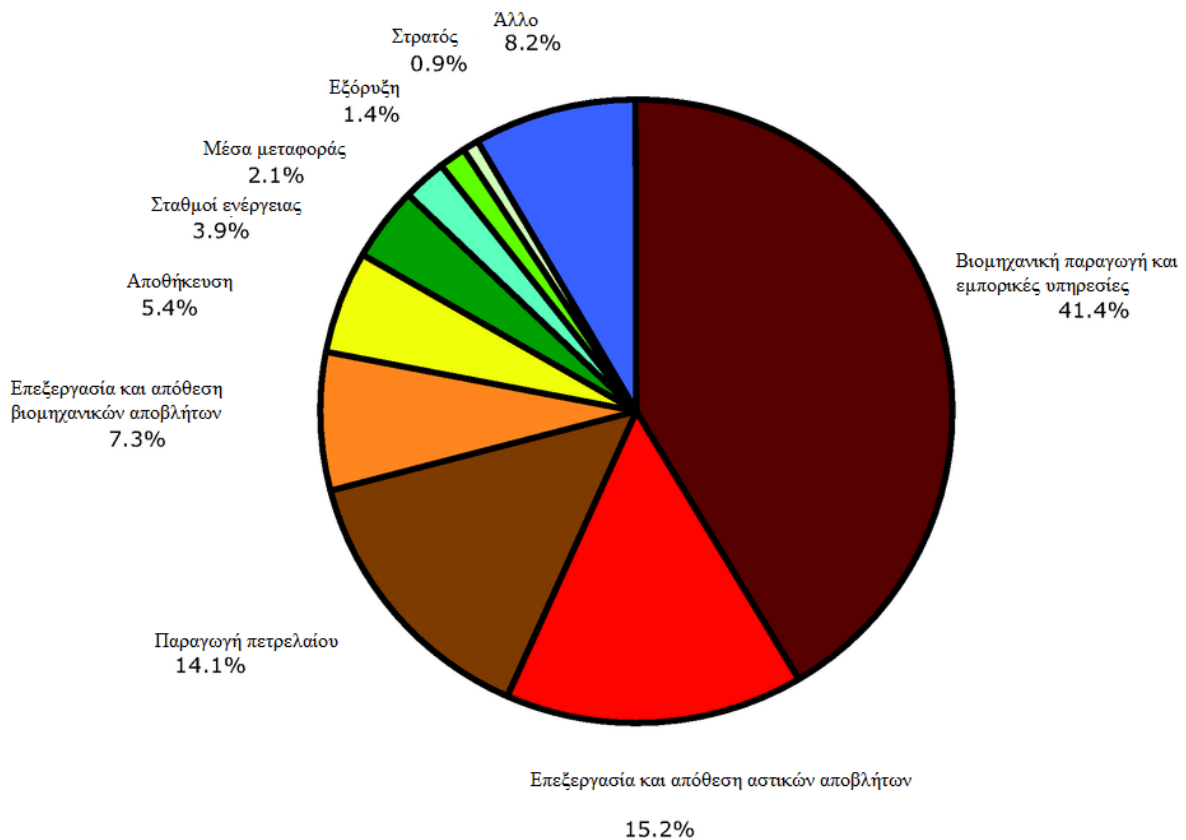
*Πηγή: <http://www.who.int/heli/risks/urban/urbanenv/en/>

Η ατμοσφαιρική ρύπανση έχει επιπτώσεις και στο περιβάλλον. Παρόλο που τα τελευταία χρόνια οι προσπάθειες στην ΕΕ για τη μείωση της οξίνισης ευοδόθηκαν, η όξινη βροχή εξακολουθεί να είναι απειλή για 240.000 χμ² ευρωπαϊκών δασικών εκτάσεων, ενώ μερικές λίμνες στη Σκανδιναβία ενδέχεται να μην ανακάμψουν ποτέ από την οξίνιση του παρελθόντος. Η όξινη βροχή κατακεραυνώνει την οργανική ύλη και ορισμένα μέταλλα και διαβρώνει κτίρια καταστρέφοντας την πολιτιστική μας κληρονομιά.

2.3.2 Ρύπανση του εδάφους

Το έδαφος και το υπέδαφος του πλανήτη μας, τα τελευταία χρόνια, έχει αρχίσει ν' αλλοιώνεται σε βάθος μερικών μέτρων από τα λιπάσματα, τα απορρίμματα, τα φυτοφάρμακα και άλλες ανθρώπινες παρεμβάσεις (Σχήμα 1.2). Τα ζιζανιοκτόνα και τα λιπάσματα παρασύρονται από τα νερά της βροχής και εισέρχονται στα υπόγεια ύδατα, όπου προκαλούν μαζική ρύπανση τεραστίων εκτάσεων. Οι ρύποι αυτοί πέφτουν στις θάλασσες, στις λίμνες και στα ποτάμια, απειλώντας έτσι σοβαρά, σε παγκόσμια κλίμακα, τη ζωή μέσα στο νερό.

Σχήμα 1.2. Ανακεφαλαίωση δραστηριοτήτων που προκαλούν ρύπανση των εδαφών στην Ευρώπη



* Πηγή: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/progress-in-management-of-contaminated-sites/progress-in-management-of-contaminated-1>

2.3.3 Ρύπανση των υδάτων

Εδώ και δεκαετίες, οι επιστήμονες, οι αλιείς, οι ναυτικοί, και οι απλοί πολίτες ανησυχούν για την υποβάθμιση του θαλάσσιου υδάτινου περιβάλλοντος. Στο επίκεντρο των ανησυχιών τους βρίσκεται η ρύπανση. Οι αιτίες που την προκαλούν είναι πολλές και ενδεικτικά: οι βιομηχανικές εκπομπές, τα μη επεξεργασμένα λύματα, οι απορρίψεις διαφόρων ουσιών από τα πλοία, η ρύπανση που καταλήγει στη θάλασσα μέσω των ποταμών.

2.4 Βιομηχανικά απόβλητα

Τα βιομηχανικά απόβλητα προέρχονται από την παραγωγική διαδικασία (κατανάλωση νερού σε πολυάριθμες υγρές διεργασίες) όπως π.χ. από βιομηχανίες μετάλλου, χημικών προϊόντων, συνθετικών υλών, κονσερβοποιείων, βαφείων, γαλακτοβιομηχανιών κλπ. τα οποία περιέχουν υπολείμματα υλών οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά την παραγωγική διαδικασία ή παράγονται από τη βιοτεχνία ή τη βιομηχανία. Η ποσότητα των βιομηχανικών αποβλήτων είναι διαφορετική για κάθε βιομηχανία, ακόμα και ανάμεσα σε ομοειδείς βιομηχανίες. Αυτό είναι συνάρτηση της δυναμικότητας του εργοστασίου και οφείλεται στον τρόπο παραγωγικής διαδικασίας, στην ποιότητα της πρώτης ύλης και στο είδος του τελικού προϊόντος. Η παραγωγή των αποβλήτων μπορεί να είναι συνεχής ή διακεκομμένη κατά το χρόνο λειτουργίας του εργοστασίου, επίσης μπορεί να περιορίζεται μόνο σε συγκεκριμένες εποχές του χρόνου (π.χ. κονσερβοποίηση φρούτων). Για τα βιομηχανικά απόβλητα δεν είναι δυνατόν να δοθούν

συγκεκριμένες τιμές ποσότητας, σε αντίθεση με τα αστικά λύματα, όπου η διακύμανση είναι σχετικά μικρή. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται ενδεικτικές τιμές με μεγάλες διακυμάνσεις.

2.4.1 Σύσταση βιομηχανικών αποβλήτων

Οι ρυπαντικές ουσίες που υπάρχουν στα βιομηχανικά απόβλητα αλλοιώνουν τα φυσικά, χημικά και βιολογικά χαρακτηριστικά του νερού. Οι ουσίες αυτές ανάλογα με τις ιδιότητες, τη συμπεριφορά και την επίδρασή τους διακρίνονται σε φυσικούς και χημικούς ρυπαντές. Οι ουσιαστικές γνώσεις των ρυπαντικών ουσιών, φυσικών (αδιάλυτες, διαλυτές, κολλοειδείς), ή χημικών (ανόργανες, οργανικές, ραδιενεργά και τοξικά στοιχεία) είναι βασική προϋπόθεση για τον έλεγχο της λειτουργίας των εγκαταστάσεων επεξεργασίας βιομηχανικών αποβλήτων. Ακόμα, ο σωστός εξοπλισμός και η καλή οργάνωση του εργαστηρίου καθώς επίσης και η τήρηση των γενικών κανόνων δειγματοληψίας και ανάλυσης αποτελούν βασική προϋπόθεση για τον έλεγχο της λειτουργίας μιας εγκατάστασης επεξεργασίας βιομηχανικών αποβλήτων.

2.4.1.1 Φυσικοί ρυπαντές βιομηχανικών αποβλήτων

Οι φυσικοί ρυπαντές προσδίδουν στα απόβλητα χρώμα, οσμή και θολότητα. Εκτός από την θερμοκρασία σ' αυτούς ανήκουν:

- αδιάλυτες ουσίες, (επιπλέουσες, αιωρούμενες, καθιζάνουσες).
- διαλυτές ουσίες (ζάχαρη, άλλες γλυκαντικές ύλες, αλάτι, διάφορα άλατα κλπ.).
- κολλοειδείς ουσίες σε λεπτό καταμερισμό (ουσίες που κυρίως προσδίδουν θολότητα).

2.4.1.2 Χημικοί ρυπαντές βιομηχανικών αποβλήτων

Στους χημικούς ρυπαντές των αποβλήτων ανήκουν:

- ανόργανες ουσίες, (χλωριούχα ιόντα, φώσφορος, άζωτο, διάφορες τοξικές ενώσεις, βαρέα μέταλλα κλπ.).
- οργανικές ουσίες, (υδρογονάνθρακες, αλκοόλες, υδατάνθρακες, λίπη, έλαια, φαινόλες, πρωτεΐνες, παρασιτοκτόνα, εντομοκτόνα κλπ.).
- ραδιενεργά στοιχεία και ενώσεις τους.

Η παρουσία των χημικών ρυπαντών στα απόβλητα επηρεάζει και αλλοιώνει τα βιολογικά και τα χημικά χαρακτηριστικά του νερού.

3 Εισαγωγή στη χαρτοβιομηχανία

3.1 Γενικά

Το χαρτί ουσιαστικά είναι ένα φύλλο ινών κυτταρίνης με έναν αριθμό προστιθέμενων συστατικών που επηρεάζουν την ποιότητα του φύλλου και την καταλληλότητα του.

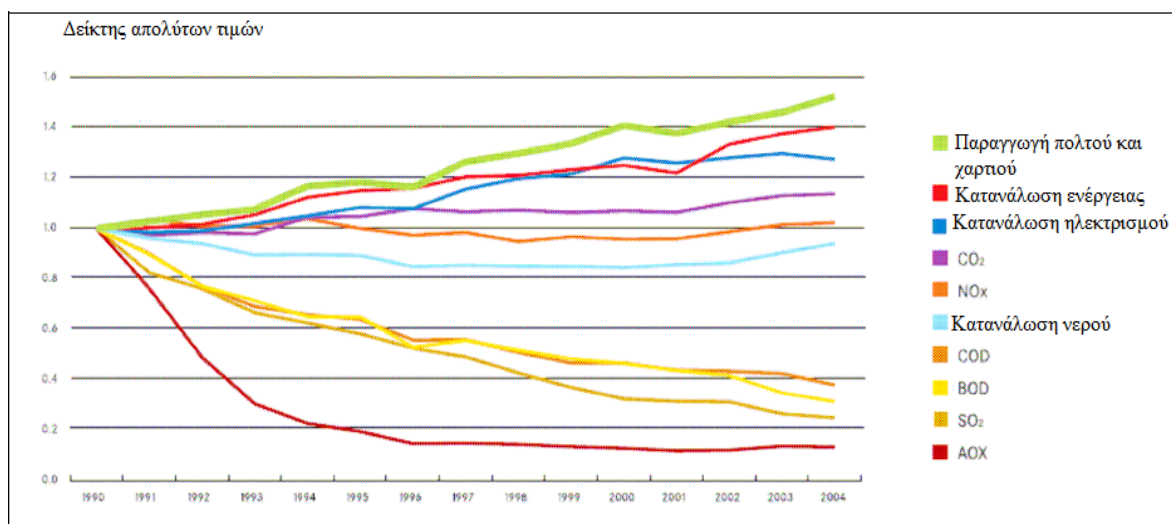
Ο πολτός για την κατασκευή χαρτιού μπορεί να παραχθεί από παρθένες ίνες με χημικά ή μηχανικά μέσα ή με επαναπολοποίηση ανακυκλώσιμου χαρτιού. Στη διεργασία πολτοποίησης η πρώτη ύλη που φέρει την κυτταρίνη διασπάται σε ατομικές ίνες.

Οι πολτοί που παράγονται με διαφορετικούς τρόπους έχουν διαφορετικές ιδιότητες, που τους κάνουν κατάλληλους για συγκεκριμένα προϊόντα.

Η χαρτοβιομηχανία σήμερα είναι μία περιβαλλοντικά φιλική βιομηχανία με σχετικά χαμηλές εκπομπές που συχνά δεν έχουν μεγάλη τοξικότητα. Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται – ίνες και πληρωτικά υλικά- είναι ευδιάλυτες στο νερό. Το νερό που χρησιμοποιείται για την παραγωγή χαρτιού πάντα εξάγει διαλυτές ουσίες που περιέχονται στις ίνες. Χημικά πρόσθετα (κυρίως ευδιάλυτα στο νερό) χρησιμοποιούνται μόνο σε μικρές ποσότητες.

Οι ευρωπαϊκές βιομηχανίες πολτού και χαρτιού έχουν επενδύσει ουσιαστικά σε περιβαλλοντικές βελτιώσεις. Το αποτέλεσμα είναι η αποσύνδεση των περιβαλλοντικών συνεπειών από την παραγωγική ανάπτυξη. Ενώ η παραγωγή και κάποιες φυσικές παράμετροι (κατανάλωση ενέργειας, ηλεκτρισμού και νερού) έχουν αυξηθεί από το 1990 (η παραγωγή κατά 150%, για παράδειγμα) ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος μετρούμενος σε εκπομπές όπως CO₂ (Carbon dioxide – διοξείδιο του άνθρακα), BOD (biochemical oxygen demand – βιοχημική απαίτηση οξυγόνου), COD (chemical oxygen demand – χημική απαίτηση οξυγόνου), AOX, SO₂ (sulfur dioxide – διοξείδιο του θείου) και NO_x (nitrogen oxides – οξείδια του αζώτου) έχει μειωθεί. Το Σχήμα 2.1 δίνει τα απόλυτα επίπεδα εκπομπών που προκύπτουν από το 1990. (European Commission, Δεκέμβριος 2001)

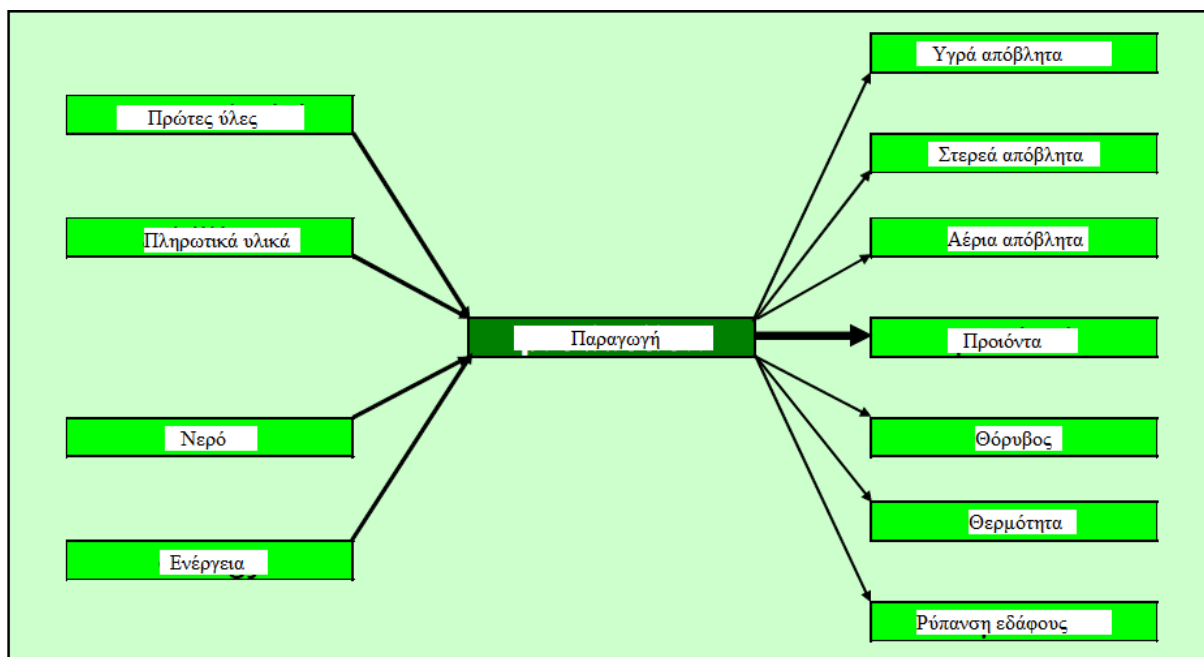
Σχήμα 2.1. Επίπεδα παραγωγής και εκπομπών ευρωπαϊκής βιομηχανίας πολτού και χάρτου



Πηγή: European Commission, Δεκέμβριος 2001

Επίσης, στο Σχήμα 2.2 εμφανίζονται οι εισοδοί και έξοδοι της χαρτοβιομηχανίας.

Σχήμα 2.2. Διάγραμμα εισόδων – εξόδων για παραγωγή χαρτιού



Πηγή: European Commission, Δεκέμβριος 2001

Πρωταρχικό σκοπό αποτελεί η εξισορρόπηση των εισόδων και εξόδων ώστε να μην εμφανίζεται οικολογικός αντίκτυπος. Η χαρτοβιομηχανία έχει ως πλεονέκτημα σε σύγκριση με άλλους βιομηχανικούς παραγωγούς το γεγονός ότι οι πρώτες ύλες της είναι ανανεώσιμες πηγές. Επομένως, η βιομηχανία πολτού και χαρτιού έχει όλα τα χαρακτηριστικά για να γίνει πλήρως βιώσιμη. (Möbius Christian H., 2006)

Περισσότερο από 95% των ουσιών που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή χαρτιού είναι ευδιάλυτες στο νερό ίνες και πληρωτικά υλικά, με πηγή των ινών κυρίως το ξύλο ή τα απορρίμματα χαρτιού. Έτσι στην Ευρωπαϊκή Ένωση παρατηρείται ποσοστό ανακύκλωσης πρώτων υλών στο 66%.

Στο παρελθόν, το προϊόν που προέκυπτε από την παραγωγική διαδικασία δεν λαμβανόταν υπόψη όσον αφορά τις οικολογικές συνέπειες. Αλλά κάθε ανθρωπογενές υλικό που ελευθερώνεται στο περιβάλλον έχει οικολογικό αντίκτυπο, που πρέπει να ποσοτικοποιείται.

Στερεά, υγρά και αέρια απόβλητα (υπολείμματα παραγωγής, ουσίες) προκύπτουν στην παραγωγική διαδικασία πολτού και χάρτου. Με τη διαμόρφωση βελτιωμένων και νέων διεργασιών, η δημιουργία τους μπορεί να αποφευχθεί μερικώς αλλά ποτέ πλήρως. Ένα σημαντικό μέρος των αποβλήτων ανακυκλώνεται, ανακτάται, χρησιμοποιείται ως προσθετικό στοιχείο σε διαφορετικές διεργασίες ή χρησιμοποιείται θερμικά για παραγωγή ενέργειας.

Όσον αφορά τις εκπομπές επιβλαβών ουσιών που εμφανίζονται στο Σχήμα 2.2 παρατηρείται το εξής:

Πολλοί μύλοι λειτουργούν με δικούς τους σταθμούς ενέργειας αφού εκτός από ηλεκτρική ενέργεια χρειάζεται επίσης και ατμός για την παραγωγή χαρτιού. Πολλοί από αυτούς έχουν χωρητικότητα κάτω από 50 MW. Συνήθως η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται είναι μόνο ένα μέρος της ποσότητας που απαιτείται, ενώ ο ατμός παράγεται στην απαραίτητη ποσότητα για το μύλο.

Η ξήρανση του μηχανικά αφυδατωμένου χαρτιού (μετά την πίεση της χαρτομηχανής) με περιεκτικότητα σε νερό 45 – 55% παράγει ένα μείγμα αέρα και ατμού με χαμηλή περιεκτικότητα σε οργανικές ουσίες.

Η άσχημη οσμή που μερικές φορές εκπέμπεται από τους μύλους χαρτιού προκύπτει από διάφορες πηγές. Μία πιθανή πηγή είναι η πρώτη ύλη, άλλη μπορεί να είναι το ανακυκλοφορούμενο νερό στο μύλο ή ο σταθμός επεξεργασίας αποβλήτων, όταν εκτελείται αναερόβια αποδόμηση

οργανικών ουσιών. Αυτό, όμως, μπορεί και πρέπει να αποφευχθεί (επίσης για λόγους ποιότητας παραγωγής).

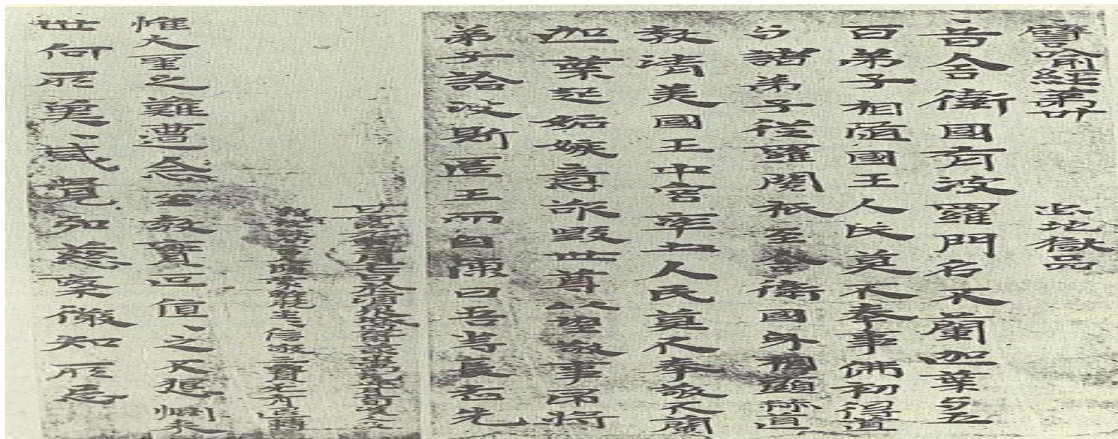
Η εκπομπή θορύβου είναι μία ουσιώδης περιβαλλοντική επιρροή της παραγωγής χαρτιού. Μπορεί να μειωθεί τεχνικά, αλλά μπορεί να φέρει υψηλό κόστος.

Η παραγωγή χαρτιού εκπέμπει θερμική ενέργεια, που κυρίως εξέρχεται με τα υγρά απόβλητα και τα αέρια.

3.2 Ιστορική αναδρομή

Το χαρτί είναι ουσιαστικά ένα φύλλο από ίνες με έναν αριθμό πρόσθετων χημικών που επηρεάζουν τις ιδιότητες και την ποιότητα του φύλλου. Ήταν οι Κινέζοι που ανέπτυξαν το πρώτο χαρτί σχεδόν 1900 χρόνια πριν το 105 μΧ (Εικόνα 2.1). Φίλτραραν έναν πολτό χτυπημένου φλοιού μουριάς μέσω ενός κόσκινου από λωρίδες μπαμπού. Από την Κίνα, η τεχνολογία διαδόθηκε προς τα δυτικά, πρώτα στη Μέση Ανατολή, μετά κατά μήκος της νότιας Μεσογειακής ακτής, και τελικά στην Ευρώπη (Εικόνα 2.2). Εκτιμάται ότι η πρώτη παραγωγή χαρτιού στην Ευρώπη συνέβη στη Μαυριτανική Ισπανία τον 11^ο αιώνα. Καθώς η τεχνολογία κατασκευής χαρτιού διαδόθηκε προς τα δυτικά, διαφορετικές ινώδεις πρώτες ύλες δοκιμάστηκαν. Οι Άραβες αντικατέστησαν τη μουριά με βαμβάκι και οι Μαυριτανοί το αντικατέστησαν με λινάρι που φύτρωνε με πλεόνασμα στη νότια Ισπανία. Ένα πράγμα που ο φλοιός μουριάς, το βαμβάκι και το λινάρι έχουν κοινό ήταν η υψηλή περιεκτικότητα σε κυτταρίνη. Οι ίνες κυτταρίνης έχουν την ικανότητα να κάνουν δεσμούς υδρογόνου, διαμορφώνοντας ένα συμπαγές φύλλο.

Εικόνα 2.1. Το παλαιότερο βιβλίο από το 250 μΧ



Πηγή: European Commission, Δεκέμβριος 2001

Εικόνα 2.2. Ο μύλος χάρτου στη Νυρεμβέργη, το κτίριο στην κάτω δεξιά γωνία, το 1493



Πηγή: Wang Lawrence K.

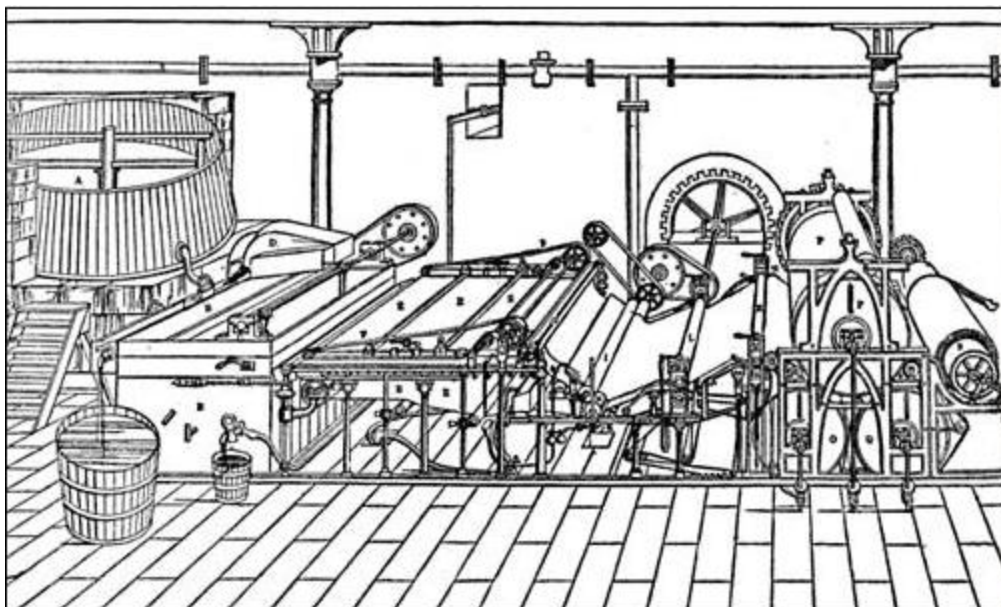
Το 13^ο αιώνα, οι Ιταλοί βελτίωσαν τη διαδικασία κατασκευής χαρτιού βρέχοντας τις ίνες. Αυτή η εμπότιση είχε δύο σκοπούς: αρχικά, έσπαγε τους εσωτερικούς δεσμούς στην ίνα, καθιστώντας την πιο ευμετάβλητη, αυξάνοντας τη διαϊνική επαφή, και έτσι διευκολύνοντας τη δημιουργία δεσμών. Δεύτερον, μίκραινε τις ίνες, παράγοντας χαρτί με μεγαλύτερη ομοιομορφία εξαιτίας καλύτερης κατανομής των ινών κυτταρίνης στο φύλλο χαρτιού. Οι Ιταλοί επίσης πρόσθεσαν επίχριση ζελατίνης στο χαρτί. Αυτό βοήθησε στον έλεγχο απορροφητικότητας του, έτσι ώστε να μην απορροφά μία μεγάλη ποσότητα μελανιού που θα προκαλούσε θαμπάδα στη σελίδα.

Η παραγωγή χαρτιού μέχρι εκείνη τη στιγμή γινόταν με το χέρι. Ένα καλούπι αποτελούμενο από ισχυρά δεμένα σύρματα προσδεμένα σε ένα ορθογώνιο σκελετό βυθίζεται σε μία δεξαμενή που περιέχει τις ίνες. Το καλούπι μετά αφαιρείται και το νερό εξέρχεται από τα σύρματα, παγιδεύοντας ένα ινώδες στρώμα. Αυτό έπειτα απομακρύνεται από το καλούπι και επιπλέον νερό πιέζεται προς τα έξω και αφήνεται να ξεραθεί. Όταν ολοκληρωνόταν αυτό, παραγόταν ένα φύλλο χαρτιού.

3.2.1 Σύγχρονη κατασκευή χαρτιού

Ο ερχομός των μηχανών Fourdrinier (Εικόνα 2.3) και των κυλινδρικών μηχανών κατασκευής χαρτιού στην αρχή του 19^{ου} αιώνα έφερε την επανάσταση στη συγκεκριμένη βιομηχανία. Εξαιτίας αυτών των μηχανών, το χαρτί τώρα γίνεται πολύ πιο φθινό, προκαλώντας δραματική μείωση της τιμής του και συνεπακόλουθη αύξησης της ζήτησης του. Με αυτήν την αυξημένη ζήτηση, νέες πρώτες ύλες χρειάζονταν για την παροχή ινών κυτταρίνης, του κύριου συστατικού του χαρτιού.

Εικόνα 2.3. Η χαρτομηχανή όπως κατασκευάστηκε από τους Bryan Donkin και τους αδερφούς Fourdriniers από πατέντα του Nicholas Louis Robert



Πηγή: Wang Lawrence K.

Το 1867, η άλεση ξύλου και περαιτέρω διεργασία έκανε το ξύλο άλλη μία πηγή ινών κυτταρίνης. Δυστυχώς, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2.1, η λινίνη είναι σε μεγάλη ποσότητα στο ξύλο. Η λινίνη είναι υδροφοβική και αναστέλλει την πλαστικοποίηση με τον εμποτισμό, και επομένως αναστέλλει τις συνδέσεις. Επίσης, η λινίνη παρέχει το καφέ χρώμα στο χαρτί. Επομένως, για υψηλής ποιότητας πολτό, η χημική εξαγωγή είναι απαραίτητη για την αφαίρεση της λινίνης.

Πίνακας 2.1. Σύνθεση ινών

	Σύνθεση , %		
	Κυτταρίνη	Ημικυτταρίνη	Λινίνες
Βαμβάκι	96	3	1
Λινάρι	85	10	5
Μαλακό ξύλο	50	20	30
Ξηρό ξύλο	50	30	20

Πηγή: Wang Lawrence K.

3.3 Συστατικά στοιχεία χαρτοβιομηχανίας

Η βιομηχανία χαρτιού και συναφών προϊόντων (Εικόνα 2.4) αποτελείται από τρεις τύπους εγκαταστάσεων: τους μύλους πολτού που επεξεργάζονται παρθένες ίνες ξύλου ή επεξεργασμένες ίνες για τη δημιουργία πολτού, τους μύλους χαρτιού και χαρτονιού που κατασκευάζουν χαρτί ή χαρτόνι και τις εγκαταστάσεις μεταποίησης που χρησιμοποιούν αυτά τα πρωτογενή υλικά για την κατασκευή πιο ειδικών προϊόντων όπως κόλλες αναφοράς, χαρτοπετσέτες ή χαρτομάντιλα. Η διεργασία μεταποίησης χαρτιού δεν αποτελεί πηγή ρύπανσης, όπως συμβαίνει με τις πρώτες δύο εγκαταστάσεις.

Εικόνα 2.4. Εγκαταστάσεις βιομηχανίας χαρτιού

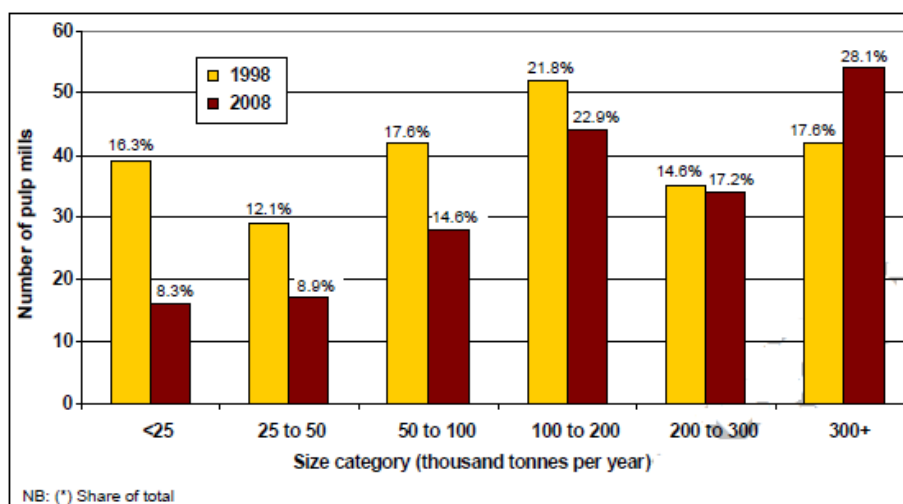


Πηγή: Wang Lawrence K.

Οι συγκεκριμένες συνιστώσες στη βιομηχανία πολτού και χαρτιού περιλαμβάνουν τα ακόλουθα (European Commission, Δεκέμβριος 2001):

- Μύλους πολτού. Αυτοί διαχωρίζουν τις ίνες του ξύλου ώστε να δημιουργηθεί ο πολτός. Οι μύλοι μπορούν να χρησιμοποιήσουν χημικές, ημιχημικές ή μηχανικές διεργασίες και οι περισσότεροι λευκαίνουν τον πολτό που παράγουν, και όταν τα απόβλητα χαρτιού μετατρέπονται σε δευτερογενή ίνα, την απομελανώνουν επίσης. Κατά τη διάρκεια δέκα χρόνων, παρά την μέση ετήσια αύξηση της παραγωγής πολτού κατά 1.4%, ο αριθμός των μύλων πολτού στην Ευρώπη μειώθηκε από 249 σε 192 (Σχήμα 2.3). Στο ίδιο χρονικό διάστημα, η μέση χωρητικότητα των μύλων αυξήθηκε από 165000 τόνους / χρόνο σε 239000.

Σχήμα 2.3. Αριθμός μύλων πολτού ανά όγκο στην Ευρώπη από 1998 - 2008



Πηγή: European Commission, Δεκέμβριος 2001

- Μύλους χαρτιού. Αυτοί κυρίως δεσμεύονται στην κατασκευή χαρτιού από πολτό ξύλου και πολτό άλλης ίνας, και επίσης μπορούν να κατασκευάσουν μεταποιημένα χάρτινα προϊόντα.

- Μύλους χαρτονιού. Αυτοί κυρίως δεσμεύονται στην κατασκευή χαρτονιού.
- Χαρτοκιβώτια και κουτιά. Αυτές οι εγκαταστάσεις δεσμεύονται στην κατασκευή κουτιών και κιβωτίων από κυματοειδείς και στερεές ίνες από αγορασμένο χαρτόνι.

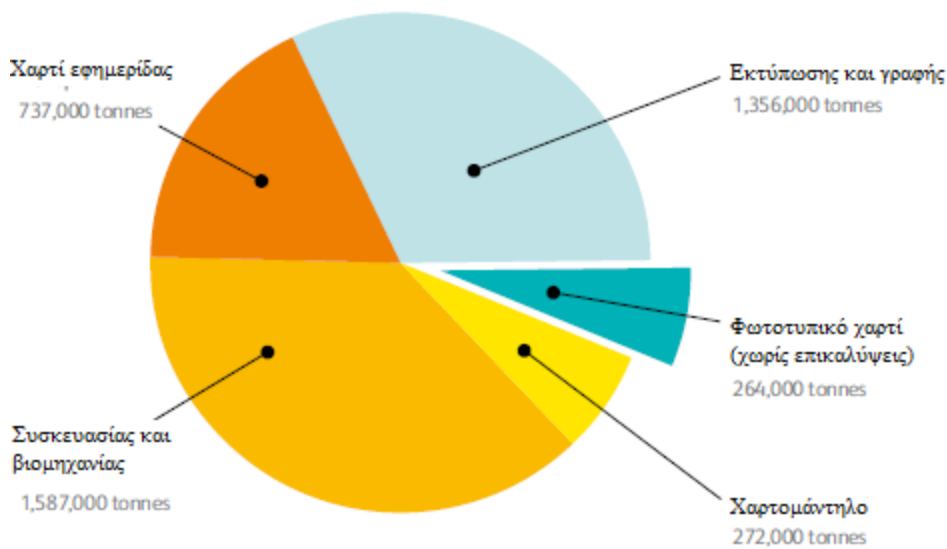
Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό της βιομηχανίας πολτού και χάρτου είναι η υπερσύνδεση των λειτουργιών ανάμεσα στους μύλους πολτού και στην επεξεργασία του πολτού σε χαρτί, χαρτόνι κτλ.

3.4 Συνολική παραγωγική διαδικασία χαρτοβιομηχανίας

Το χαρτί είναι ένα σημαντικό προϊόν της δασοκομικής βιομηχανίας και χρησιμοποιείται ευρέως στην κοινωνία μας. Τα προϊόντα χαρτιού δεν χρησιμοποιούνται μόνο στις εμφανείς εφαρμογές τους στην βιομηχανία εκδόσεων και ως μέσα γραφής, αλλά επίσης σε μία ποικιλία ειδικών χαρτιών, χαρτονιών κτλ. Επίσης, αρκετές χημικές ουσίες παράγονται ως παραπροϊόντα της βιομηχανίας πολτού και χάρτου.

Το χαρτί, ο πολτός κυτταρίνης, το χαρτόνι, το κυματοειδές χαρτόνι, το περιτύλιγμα, το σελοφάν, το τεχνητό νήμα μεταξιού, το πλαστικό και άλλα χρήσιμα προϊόντα, χρησιμοποιούμενα στην καθημερινή ζωή και σε ανθρώπινες οικονομικές δραστηριότητες, αντιπροσωπεύουν τον τομέα της βιομηχανίας (Σχήμα 2.4).

Σχήμα 2.4. Είδη χαρτιού και ποσοστά παραγωγής τους



*Πηγή: AP3 (Australian Plantation Products and Paper Industry Council), APIA (Australasian Paper Industry Association) and ACOR (The Australian Council of Recyclers)

Η χρήση αυτών των προϊόντων σε παγκόσμια κλίμακα αυξάνεται συνεχώς. Η κύρια πρώτη ύλη για την παραγωγή τους είναι διαφορετικό φυτό όπως φαίνεται και στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2. Είδος φυτού για την παραγωγή κυτταρίνης

Πρώτη ύλη	Περιεκτικότητα σε κυτταρίνη
Κωνοφόρο ξύλο	36 – 50 %
Ξύλο από πλατύφυλλο δέντρο (οξυά, λεύκη κτλ)	40 – 50 %
Άχυρο (μίσχοι σιταριού και σίκαλης)	~ 30 %
Λινάρι	~ 80 %
Βαμβάκι	~ 90 %

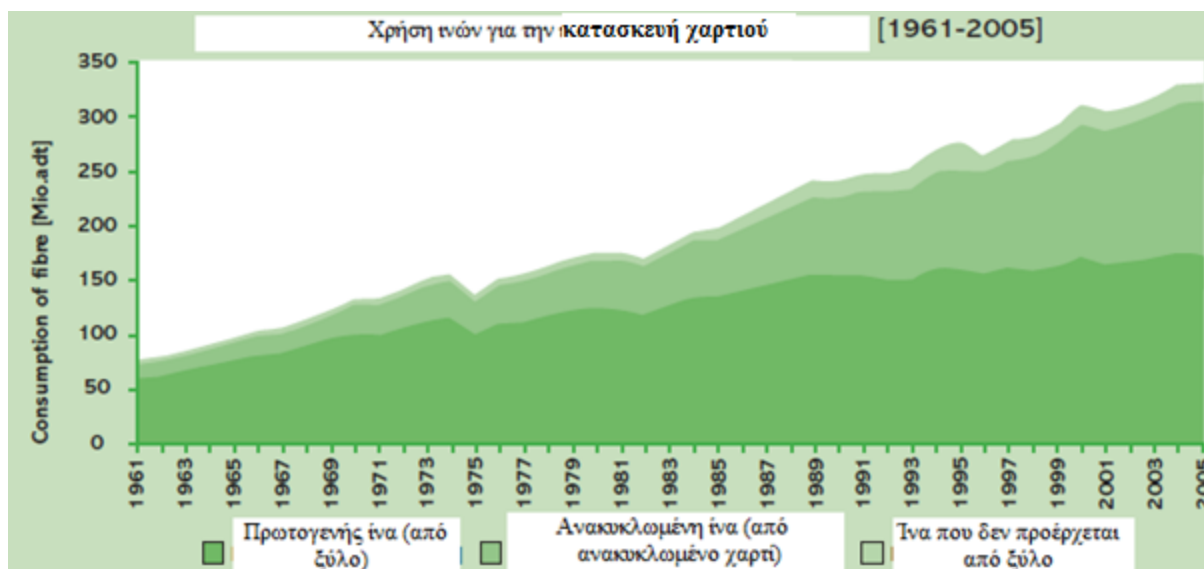
Πηγή: Mladenov M., 2010

Παρά το γεγονός ότι στους μίσχους του λιναριού και του βαμβακιού κρατείται το μεγαλύτερο ποσοστό κυτταρίνης, πιο συχνά χρησιμοποιούνται το ξύλο και το άχυρο, εξαιτίας της μεγαλύτερης διαθεσιμότητας τους και του υψηλότερου αποτελέσματος που παρέχουν (Mladenov M., 2010). Η βιομηχανική παραγωγή του πολτού κυτταρίνης σε γενικές γραμμές, περιλαμβάνει την επεξεργασία πρώτων υλών με διαφορετικά χημικά αντιδραστήρια με τα οποία μπορούν πλήρως να εξαγάουν συμπληρωματικές ουσίες, χωρίς να καταστρέφουν την κυτταρίνη. Σύμφωνα με τον τύπο του αντιδραστηρίου που χρησιμοποιείται, οι μέθοδοι για την εξαγωγή κυτταρίνης χωρίζονται σε :

- Αλκαλικές, που περιλαμβάνουν το υδροξείδιο νατρίου NaOH και σουλφίδια (NaOH + Na₂S).
- Οξίνες, που περιλαμβάνουν θειώδες άλας και νιτρικά οξέα.
- Συνδυασμένες μεθόδους, όπως χλωροαλκαλικές κτλ.

Όμως, εκτός από τη χρήση ινών από επεξεργασία ξύλου, για την κατασκευή χαρτιού μπορεί να χρησιμοποιηθούν και ίνες από ανακυκλωμένο χαρτί αλλά και ίνες από άλλη πηγή που δεν είναι το ξύλο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.5.

Σχήμα 2.5. Ποσότητα ινών που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή χαρτιού



3.4.1 Χημική σύσταση του ξύλου

Τα χημικά συστατικά του ξύλου διακρίνονται σε μακρομοριακές (μεγάλου μοριακού βάρους) χημικές ενώσεις όπως είναι η κυτταρίνη, οι ημικυτταρίνες (πολυόζες) και η λιγνίνη και σε μικρομοριακές ενώσεις στις οποίες ανήκουν τα εκχυλίσματα και οι ανόργανες ενώσεις. Οι μακρομοριακές χημικές ενώσεις αποτελούν τα δομικά συστατικά των κυτταρικών τοιχωμάτων του ξύλου και υπάρχουν σε όλα τα ξυλώδη είδη του φυτικού κόσμου.

Το ξύλο των φυτικών ειδών της εύκρατης ζώνης περιέχει περίπου 97-99% μακρομοριακές ενώσεις ενώ στο ξύλο των φυτικών ειδών της τροπικής ζώνης περιέχονται περίπου 90% μακρομοριακές ενώσεις. Το κύριο δομικό συστατικό του ξύλου είναι η κυτταρίνη η οποία δομεί περίπου τα 50% της ξυλώδους μάζας των Κωνοφόρων και Πλατύφυλλων ειδών και έχει σε όλα τα είδη την ίδια χημική σύσταση.

Το κύριο συστατικό ξύλου που χρειάζεται να αφαιρεθεί για να μετατραπεί σε χαρτί είναι μία ένωση γνωστή ως λιγνίνη. Αυτό το όνομα αναφέρεται σε μία ομάδα χημικών ουσιών που ουσιαστικά είναι πολυμερή. Η λιγνίνη είναι η ενισχυτική ένωση που τοποθετείται στα τοιχώματα των κυττάρων του δέντρου και κάνουν το ξύλο αρκετά δυνατό για να αντέξει το βάρος των κλαδιών. Όμως, είναι επίσης η ένωση που κάνει τον πολτό ξύλου χρώματος καφετί, και έτσι αφαιρείται από αυτόν εκτός αν χρησιμοποιείται για παραγωγή καφέ χαρτιού ή χαρτονιού.

3.4.2 Τεχνικές πολτοποίησης ξύλου

Υπάρχουν δύο γενικές τάξεις διεργασιών:

- Η μηχανική πολτοποίηση, όπου η μηχανική ενέργεια χρησιμοποιείται για τον φυσικό διαχωρισμό των ινών.
- Η χημική πολτοποίηση, όπου ένας συνδυασμός χημικών, θερμότητας και πίεσης διασπά την λιγνίνη και έπειτα ο πολτός πλένεται, έτσι ώστε τα χημικά να απομακρυνθούν από τις ίνες.

Οι πολτοί που προκύπτουν από την χημικοθερμομηχανική πολτοποίηση είναι ισχυρότεροι από τους μηχανικούς πολτούς και απαιτούν λιγότερη ηλεκτρική ενέργεια για να παραχθούν. Οι πολτοί αυτοί μπορούν να λευκανθούν και να παράγουν λευκασμένους χημικοθερμομηχανικούς πολτούς με απόδοση 87 – 90%.

Οι μηχανικοί πολτοί είναι γνωστοί ως μεγάλης απόδοσης επειδή μετατρέπουν σχεδόν όλο το χρησιμοποιούμενο ξύλο σε χαρτί. Επομένως, σε σύγκριση με τη χημική πολτοποίηση, λιγότερα δέντρα απαιτούνται για την παραγωγή ενός τόνου πολτού. Επειδή οι μηχανικές διεργασίες χρησιμοποιούν το μεγαλύτερο μέρος του δέντρου, οι πολτοί περιέχουν λιγνίνη, που μπορεί να προκαλέσει στο χαρτί να κιτρινίζει όταν εκτίθεται στον ήλιο.

Οι κοντές, ανθεκτικές ίνες που παράγονται με τη μηχανική πολτοποίηση παρέχουν λεία επιφάνεια τύπωσης και μεγαλύτερη αδιαφάνεια, σε σχέση με την χημική. Επίσης, οι μηχανικοί πολτοί είναι σχετικά φθινοί στην παραγωγή, αλλά έχουν τη μισή αντοχή από τους χημικούς. Τέλος, είναι ακατάλληλοι για εφαρμογές, όπου η αντοχή είναι σημαντική, όπως η συσκευασία.

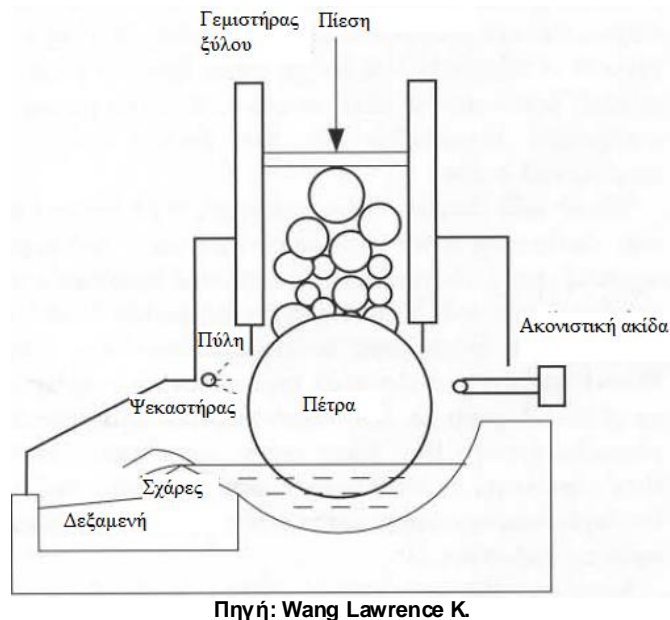
3.4.2.1 Μηχανική πολτοποίηση

Πριν το 1800, τα βιβλία τυπώνονταν σε χειροποίητο χαρτί που παραγόταν από πολλές διαφορετικές ίνες, κυρίως από λινάρι πριν την ανακάλυψη του βαμβακιού. Με την ανακάλυψη του τελευταίου από τον Eli Whitney το 1793, το βαμβάκι σταδιακά αντικατέστησε το λινάρι ως την κύρια πηγή ινών για την κατασκευή χαρτιού. Η πρώτη επιτυχής χρήση ινών ξύλου ως στοκ για χαρτί έγινε μέσω της μηχανικής πολτοποίησης το 1840. Ο Fredrich Keller, ένας βιβλιοδέτης, άρχισε να πειραματίζεται με την πίεση ξύλου κόντρα σε μία ρόδα άλεσης με τρεχούμενο νερό. Στα μέσα του

1840, είχε αναπτύξει την διεργασία άλεσης έτσι ώστε οι εφημερίδες να τυπωθούν χρησιμοποιώντας την. Το 1846, ο Keller πούλησε την εφεύρεση του σε εταιρεία της Γερμανίας και έτσι οι πρώτες εμπορικές μηχανές πολτοποίησης εγκαταστάθηκαν σε έναν μύλο το 1852.

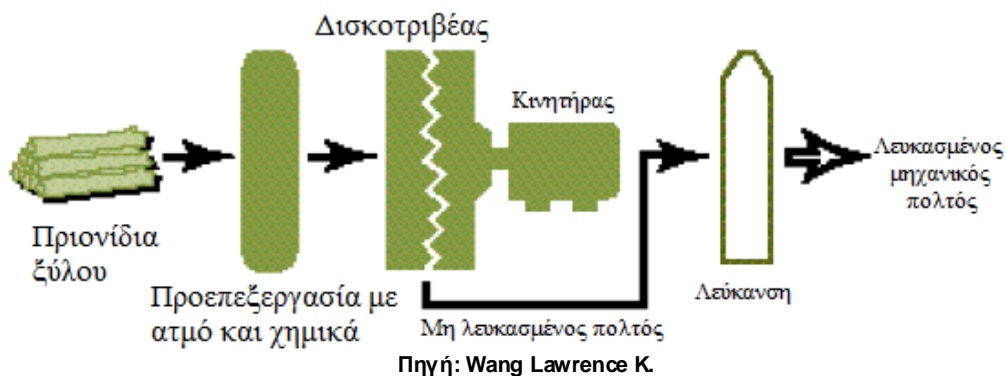
Υπάρχουν αρκετές τεχνικές μηχανικής πολτοποίησης. Στις διεργασίες άλεσης με πέτρα, το ξύλο πιέζεται με μία πέτρα υπό παρουσία νερού και οι ίνες διαχωρίζονται από το ξύλο. Σήμερα, οι πέτρες άλεσης είναι τεχνητές φτιαγμένες από καρβίδιο του πυριτίου ή οξείδιο του αλουμινίου. Έχουν διάμετρο 1.5 m και οδηγούνται από μηχανές των 2000 – 4000 kW. Το Σχήμα 2.6 δείχνει μία αντιπροσωπευτική μηχανή άλεσης και τα στοιχεία - κλειδιά της. Οι κορμοί τροφοδοτούνται σε ένα γεμιστήρα υπό πίεση στην πέτρα άλεσης. Αφού η πέτρα σταδιακά αμβλύνεται, μία ακίδα τόνου περιοδικά χρησιμοποιείται για να ακονίσει την πέτρα. Οι διαχωρισμένες ίνες απομακρύνονται με πλύση από την πέτρα σε μία δεξαμενή με σχάρες που ελέγχουν το μέγεθος της ίνας που επιτρέπεται να περάσει.

Σχήμα 2.6. Αντιπροσωπευτική μηχανή άλεσης



Οι διεργασίες άλεσης υπό πίεση είναι παρόμοιες, αλλά λειτουργούν σε υψηλότερη πίεση για την παραγωγή ισχυρότερου πολτού. Στην θερμομηχανική πολτοποίηση, ατμός εφαρμόζεται σε πριονίδια ξύλου, που μετά πιέζονται ανάμεσα σε δύο, μεγάλους περιστρεφόμενους δίσκους, γνωστούς ως δισκοτριβείς. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.7, αυτά τα βήματα φυσικά διαχωρίζουν το ξύλο σε ίνες. Αυτές οι μέθοδοι μηχανικής πολτοποίησης τυπικά μετατρέπουν 90 – 95% του ξύλου σε πολτό.

Σχήμα 2.7. Παραγωγή μηχανικού πολτού



3.4.2.2 Χημική πολτοποίηση

Η χημικοθερμομηχανική πολτοποίηση εκθέτει τα πριονίδια σε ατμό και χημικά, για να δώσουν στο χαρτί συγκεκριμένες ιδιότητες, πριν τον διαχωρισμό ινών, όπως χημικά λεύκανσης που κάνουν το χαρτί λευκό (και που επίσης το χρωματίζουν). Μία τέτοια διεργασία πολτοποίησης που χρησιμοποιείται ονομάζεται “**Kraft**” (Εικόνα 2.5).

Εικόνα 2.5. Πανοραμική εικόνα ενός σταθμού χαρτοβιομηχανίας που περιλαμβάνει σταθμό μηχανικής και kraft πολτοποίησης, σταθμό κατασκευής χαρτιού, σταθμό ενέργειας και σταθμό επεξεργασίας αποβλήτων



Πηγή: European Commission, Δεκέμβριος 2001

3.4.2.2.1 Χημική Πολτοποίηση Kraft

Αυτή η μέθοδος είναι κατά ένα μέρος μηχανική, και κατά το άλλο χημική και παράγει ένα λείο και μαλακό πολτό για την κατασκευή χαρτιού. Έχει αρκετά μειονεκτήματα (European Commission, Δεκέμβριος 2001):

- Η απόδοση του πολτού είναι αρκετά χαμηλή (45-50%).
- Ο εξοπλισμός για την ανάκτηση των χημικών ουσιών είναι εκτενής και ακριβός στην εγκατάσταση.
- Παραγωγή δύσσομων θειούχων ενώσεων.
- Απαιτούνται σχετικά πολύπλοκες διεργασίες για την λεύκανση του πολτού.

Παρόλα αυτά, η διεργασία Kraft είναι ακόμα παγκοσμίως η πιο ευρεία χρησιμοποιούμενη λόγω των παρακάτω πλεονεκτημάτων της:

- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί με όλα τα είδη ξυλείας.
- Ο πολτός έχει καλή αντοχή (η λέξη “kraft” στα Σουηδικά σημαίνει “δυνατός”)

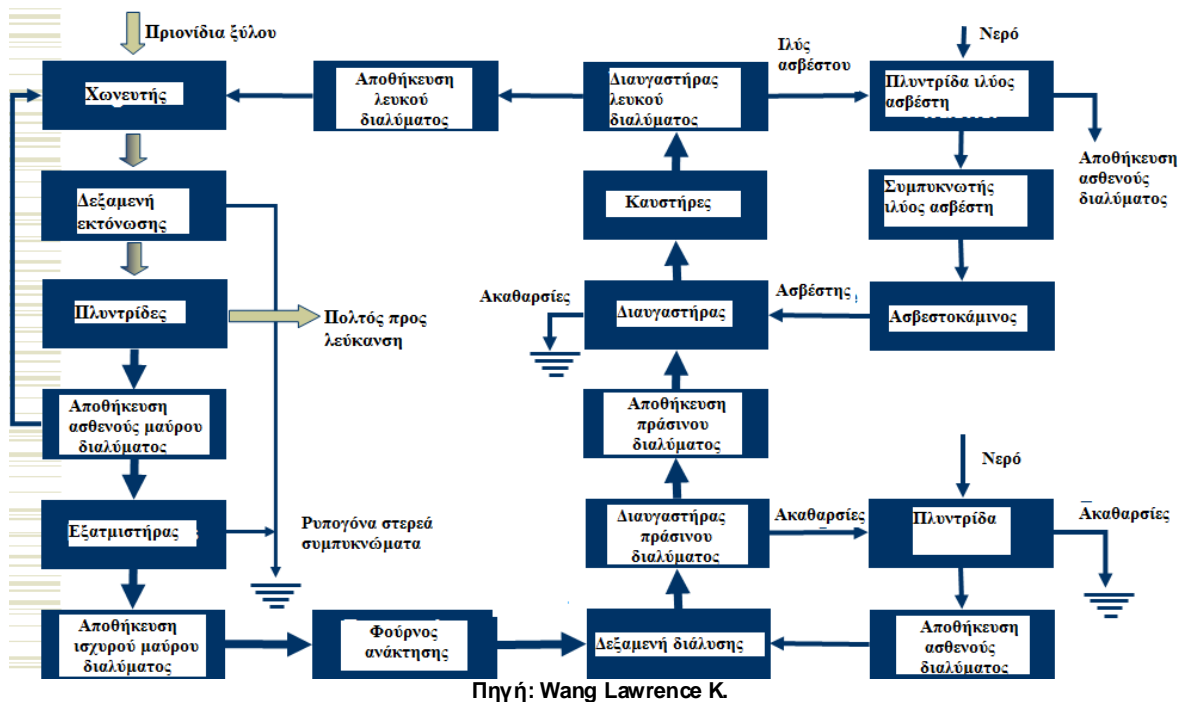
και περιλαμβάνει τα εξής βήματα (Wang Lawrence K.) (Σχήμα 2.8):

- Προετοιμασία πρώτων υλών (αφαίρεση φλοιού από δέντρα, κόψιμο σε λωρίδες 10-15 mm, διαχωρισμός και διαλογή)
- Αφέψηση του ξύλου για την εξαγωγή κυτταρίνης, τα πριονίδια του ξύλου ζεσταίνονται σε ένα μίγμα υδροξειδίου νατρίου NaOH και θειούχου νατρίου Na₂S (το οποίο ονομάζεται **λευκό διάλυμα**) σε ένα φούρνο πίεσης, όπου μεγάλη ποσότητα λιγνίνης αφαιρείται από το ξύλο. Η πίεση μετά ελευθερώνεται απότομα, προκαλώντας στα πριονίδια να μετατραπούν σε ίνες. Αυτό συμβαίνει στους πολτοποιητές, όπου εξασφαλίζεται η ανάδευση του μείγματος. Ο πολτός καταθλίβεται σε δεξαμενή αποθήκευσης, αφού προηγουμένως διέλθει από σχάρες που

παρεμβάλλονται στην αναρρόφηση. Το διήθημα που διαχωρίζεται περιέχει τις μεγάλες μεγέθους προσμίξεις που συνοδεύουν τη χαρτομάζα, όπως πέτρες, τεμάχια ξύλου κτλ.

- Έκπλυση πολτού, ο πολτός πλένεται με νερό για να αφαιρεθούν τα χημικά αφέψησης και η λιγνίνη από την ίνα, έτσι ώστε να μην εμπλέκονται σε αργότερα στάδια διεργασίας. Το αραιωμένο διάλυμα από την έκπλυση πολτού (που περιέχει διαλυμένες ανόργανες και οργανικές στερεές ενώσεις) ονομάζεται **μαύρο διάλυμα**.
- Φιλτράρισμα του πολτού που προκύπτει, ένα φίλτρο (κόσκινο) χρησιμοποιείται για την αφαίρεση κόμπων και άβραστων ινών μπερδεμένων μεταξύ τους, όπως και φυγοκεντρικοί διαυγαστήρες.
- Λεύκανση και ενίσχυση, αυτό γίνεται σε δύο στάδια. Αρχικά ο πολτός επεξεργάζεται με υδροξείδιο του νατρίου NaOH με την παρουσία οξυγόνου O₂. Το NaOH αφαιρεί ιόντα υδρογόνου από την λιγνίνη και μετά το O₂ διασπά το πολυμερές. Έπειτα, ο πολτός επεξεργάζεται με διοξείδιο χλωρίου ClO₂, μετά με ένα μίγμα από O₂, NaOH και υπεροξείδιο και τελικά με ClO₂ ξανά για να αφαιρεθεί η εναπομείνουσα λιγνίνη.

Σχήμα 2.8. Στάδια χημικής πολτοποίησης Kraft



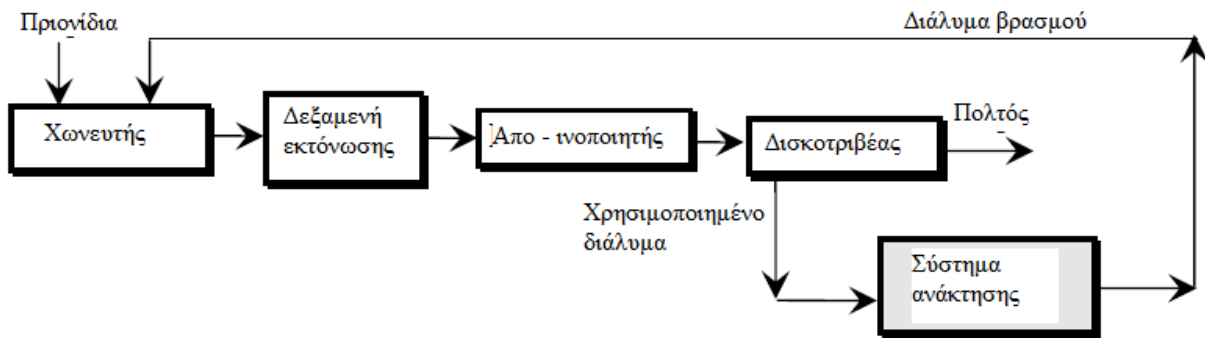
Αφού ο πολτός κατευθύνεται στο σταθμό λεύκανσης, η διεργασία Kraft συνεχίζεται ώστε τα διαλύματα (λευκό, μαύρο και πράσινο) που προκύπτουν από διαυγάσεις και χημικές αντιδράσεις είτε να επαναχρησιμοποιηθούν ή να απενεργοποιηθούν. Η συνέχεια της διεργασίας περιγράφεται αναλυτικά σε άλλη παράγραφο.

3.4.2.3 Ημιχημική πολτοποίηση

Στην ημιχημική πολτοποίηση, τα πριονίδια ξύλου αποσυνθέτονται μερικώς για να αποδυναμωθούν οι δεσμοί ανάμεσα στις ίνες, και μετά αυτά τα πριονίδια επεξεργάζονται μηχανικά σε ένα δισκοτριβέα, που χρησιμοποιεί μηχανική δράση για το διαχωρισμό των ινών (Industrial Technologies Program, Δεκέμβριος 2005) (Σχήμα 2.9).

Η απόδοση του ημιχημικού πολτού κυμαίνεται από 55 – 90%, ανάλογα τη διεργασία που χρησιμοποιείται. Όμως, η περιεκτικότητα εναπομείνουσας λιγνίνης στον πολτό είναι υψηλή, έτσι η λεύκανση είναι πιο δύσκολη από την Kraft πολτοποίηση. Επιπλέον, λιγότερες ποσότητες χημικών χρειάζονται σε σχέση με την Kraft.

Σχήμα 2.9. Ημιχημική πολτοποίηση

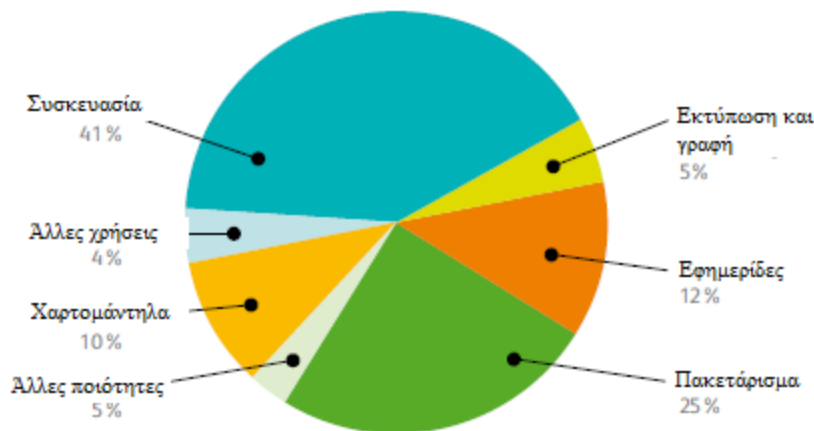


Πηγή: Industrial Technologies Program, Δεκέμβριος 2005

3.4.2.4 Επεξεργασία ανακυκλωμένων ινών

Ο ανακυκλωμένος πολτός συχνά χρησιμοποιείται αντί φρέσκου πολτού για την κατασκευή χαρτιού και είναι μία αυξανόμενη σημαντική πηγή (Σχήμα 2.10).

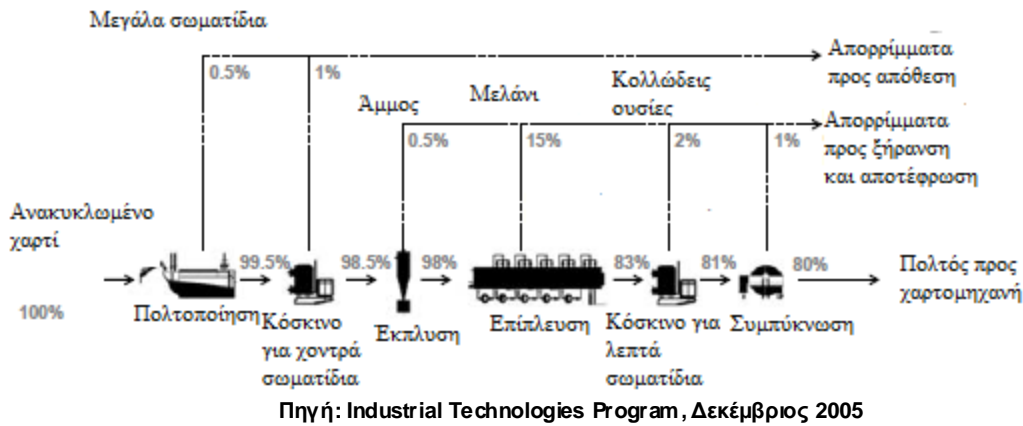
Σχήμα 2.10. Παραγωγή από ανακυκλωμένο χαρτί



*Πηγή: Metafore Paper Life Cycle Research

Σήμερα, σχεδόν 50% των ινών που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή πολτού βασίζεται στις ανακυκλωμένες ίνες. Αυτός ο τύπος πολτού έχει μικρότερη αντοχή και ακαμψία εξαιτίας των πολλών διαφορετικών προελεύσεων του χαρτιού. Σε αυτήν την περίπτωση, είναι σημαντικό να αφαιρεθούν επιβλαβείς ουσίες όπως το μελάνι, και να προετοιμαστεί ο πολτός έχοντας την ίδια ομοιομορφία. Μία απλοποιημένη γραμμή διεργασίας μονού βρόχου για παραγωγή πολτού από ανακυκλωμένο χαρτί εμφανίζεται στο Σχήμα 2.11.

Σχήμα 2.11. Γραμμή παραγωγής πολτού από ανακυκλωμένο χαρτί



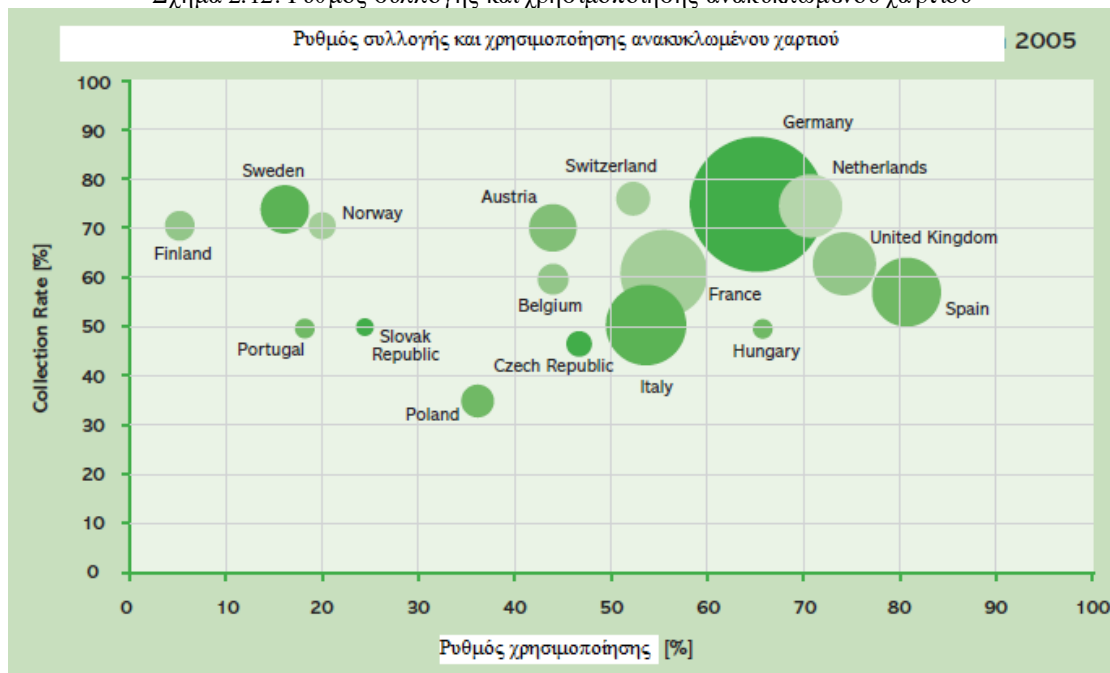
Επειδή οι ίνες στο ανακυκλωμένο χαρτί έχουν πλήρως ξεραθεί και μετά ξαναυγρανθεί, έχουν γενικά διαφορετικές φυσικές ιδιότητες από τις παρθένες ίνες. Σε κάποιες περιπτώσεις, οι μύλοι που χρησιμοποιούν ανακυκλωμένο χαρτί, χωρίς απομελάνωση, μπορούν να λειτουργήσουν χωρίς καμία εκκένωση λυμάτων λόγω της χρήσης κλειστών συστημάτων νερού μαζί με μικρά συστήματα αναερόβιας και αερόβιας βιολογικής επεξεργασίας για την αφαίρεση κάποιων οργανικών ουσιών από τα ανακυκλωμένα ύδατα.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.12, ένας υψηλός ρυθμός συλλογής ανακυκλωμένου χαρτιού δεν σημαίνει απαραίτητα μία υψηλή χρησιμοποίηση σε διάφορες χώρες, το οποίο μπορεί να εξηγηθεί με τα παρακάτω παραδείγματα:

Χώρες όπως η Φινλανδία, η Σουηδία και η Νορβηγία, που έχουν μεγάλες πηγές ξύλου και πολύ ισχυρές βιομηχανίες πολτού και χάρτου παράγουν πολύ περισσότερο χαρτί από ό,τι καταναλώνουν. Τέτοιες χώρες θα επιτύχουν συγκριτικά χαμηλότερους ρυθμούς χρησιμοποίησης ανακυκλωμένου χαρτιού παρόλο που οι ρυθμοί συλλογής του είναι πολύ υψηλοί.

Για χώρες όπως η Γερμανία και η Ολλανδία, όπου η παραγωγή χαρτιού και η κατανάλωση του είναι σχεδόν στο ίδιο επίπεδο, επίσης οι ρυθμοί συλλογής και χρησιμοποίησης είναι ίδιοι.

Σχήμα 2.12. Ρυθμός συλλογής και χρησιμοποίησης ανακυκλωμένου χαρτιού



3.4.2.4.1 Πολτοποίηση ανακυκλωμένων ινών

Η πολτοποίηση δευτερογενών ινών είναι σχετικά μία απλή διεργασία. Το πιο συνηθισμένο σχέδιο πολτοποιητή περιλαμβάνει μία μεγάλη δεξαμενή γεμάτη με νερό, που μερικές φορές θερμαίνεται, και τον ανακυκλωμένο πολτό. Χημικά πολτοποίησης (NaOH) συχνά προστίθενται για την προώθηση του διαχωρισμού του χαρτιού. Οι ίνες εισάγονται στον πολτοποιητή και αναμιγνύονται με έναν αναδευτικό κοχλία. Σκουπίδια και ακαθαρσίες αφαιρούνται με δύο μηχανισμούς. Ο πρώτος αφαιρεί κλωστές, σύρματα κτλ από το μίγμα ινών. Αποτελείται από σύρματα που περιστρέφονται στην δευτερογενή ιλύ ινών με αποτέλεσμα τα σκουπίδια να συγκεντρώνονται εκεί, σχηματίζοντας ένα στρώμα που έπειτα αφαιρείται. Βαρύτερα σκουπίδια διαχωρίζονται από το μίγμα με φυγόκεντρη δύναμη και πάφτουν σε μία εσοχή του πολτοποιητή. Ο δεύτερος μηχανισμός αποτελείται από ένα αγκιστρωτό γάντζο ή κουβά. Η θερμότητα, η διάσπαση χημικών δεσμών, οι δυνάμεις διάτμησης που δημιουργούνται με την ανάδευση και ανάμειξη, και η άλεση από μηχανικό εξοπλισμό συμβάλλουν στο διαχωρισμό των ινών και την παραγωγή ενός πολτού επιθυμητής ομοιομορφίας.

3.4.2.4.2 Απομελάνωση

Οι διεργασίες απομελάνωσης χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση μελανιού για να κάνουν τον πολτό πιο ευκρινή και πιο καθαρό. Μερικές φορές η λεύκανση επίσης εφαρμόζεται μετά την απομελάνωση.

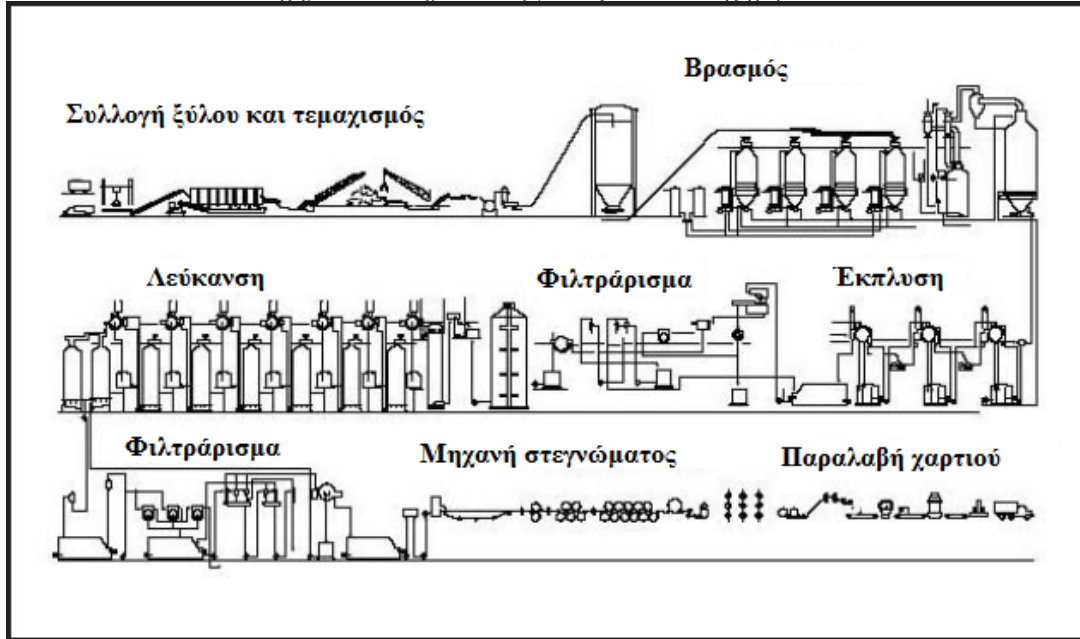
Τα ύδατα διεργασίας είναι παρόμοια με αυτά από τα συστήματα χωρίς απομελάνωση. Όμως, η απομελάνωση προκαλεί μικρότερη απόδοση και απαιτεί επιπρόσθετη εσωτερική επεξεργασία. Ο πολτός προκύπτει από 60 – 70% του ανακτημένου χαρτιού που εισέρχεται στη διεργασία με αποτέλεσμα το 30 – 40% να ελευθερώνεται στο λευκό νερό και να πρέπει να επεξεργαστεί και να αφαιρεθεί πριν την εκκένωση των λυμάτων.

Η επεξεργασία του ανακυκλωμένου χαρτιού χωρίς απομελάνωση είναι αρκετή για εφαρμογές που δεν απαιτούν υψηλή ευκρίνεια.

3.4.3 Αναλυτική περιγραφή σταδίων παραγωγής χαρτιού

Η διαδικασία όπου η ξυλεία μετατρέπεται σε χαρτί περιλαμβάνει έξι βήματα. Τα τέσσερα πρώτα μετατρέπουν τους κορμούς σε μάζα ινών κυτταρίνης χρησιμοποιώντας συνδυασμό φυσικών και χημικών διεργασιών. Ο πολτός μετά λευκαίνεται για να αφαιρεθεί η εναπομείνασα λυγνίνη και τελικά απλώνεται σε λεία, πιεσμένα φύλλα (συντά με χημικά που παρέχουν ιδιότητες όπως χρωματισμό ή αντοχή στο νερό). Για κάποια χαρτιά (χαρτόνια ή καφέ χαρτί) το στάδιο λεύκανσης δεν είναι απαραίτητο, αλλά όλα τα λευκά και χρωματιστά χαρτιά απαιτούν λεύκανση. Τα βασικά βήματα της διεργασίας κατασκευής χαρτιού φαίνονται στο Σχήμα 2.13 (Wang Lawrence K.).

Σχήμα 2.13. Βήματα διεργασίας κατασκευής χαρτιού

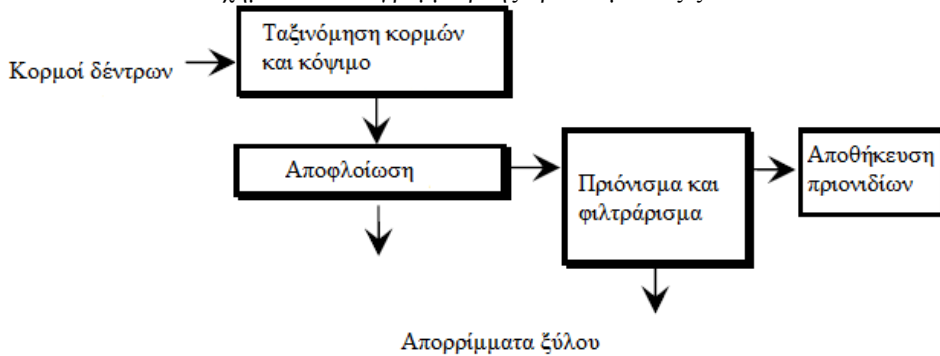


Πηγή: Wang Lawrence K.

3.4.3.1 Προετοιμασία ξύλου

Ξύλο διανέμεται στον μύλο με έναν από τους δύο τρόπους: ολόκληροι κορμοί ή πριονίδια (υπολείμματα από πριονιστήριο) (Σχήμα 2.14). Οι κορμοί χάνουν τον φλοιό τους είτε περνώντας από αποφλοιωτική μηχανή τυμπάνου ή με υδραυλικό αποφλοιωτήρα. Η πρώτη που αποτελείται από ένα ελαφρώς επικλινές περιστρεφόμενο τύμπανο, είναι κατάλληλη για κορμούς μικρής διαμέτρου. Ο υδραυλικός αποφλοιωτήρας που χρησιμοποιεί πίδακες νερού υψηλής πίεσης, μπορεί να διαχειριστεί κορμούς μεγάλης διαμέτρου. Ο αφαιρούμενος φλοιός είναι καλό καύσιμο και συχνά καίγεται σε ένα λέβητα για παραγωγή ατμού.

Σχήμα 2.14. Διάγραμμα ροής προετοιμασίας ξύλου



Πηγή: Wang Lawrence K.

Μετά την αποφλοιώση, οι κορμοί κόβονται από θρυμματιστές πολλαπλών μαχαιριών σε κομμάτια κατάλληλου μεγέθους, και φιλτράρονται μέσω κόσκινου για την αφαίρεση υπερμεγεθών πριονιδιών. Το πάχος των πριονιδιών (Εικόνα 2.6) είναι η πιο σημαντική παράμετρος, αφού καθορίζει την ταχύτητα και τον βαθμό εμποτισμού τους στα χημικά αφένησης. (European Commission, Δεκέμβριος 2001)

Εικόνα 2.6. Στοίβα από πριονίδια



Πηγή: European Commission, Δεκέμβριος 2001

3.4.3.2 Αφέψηση

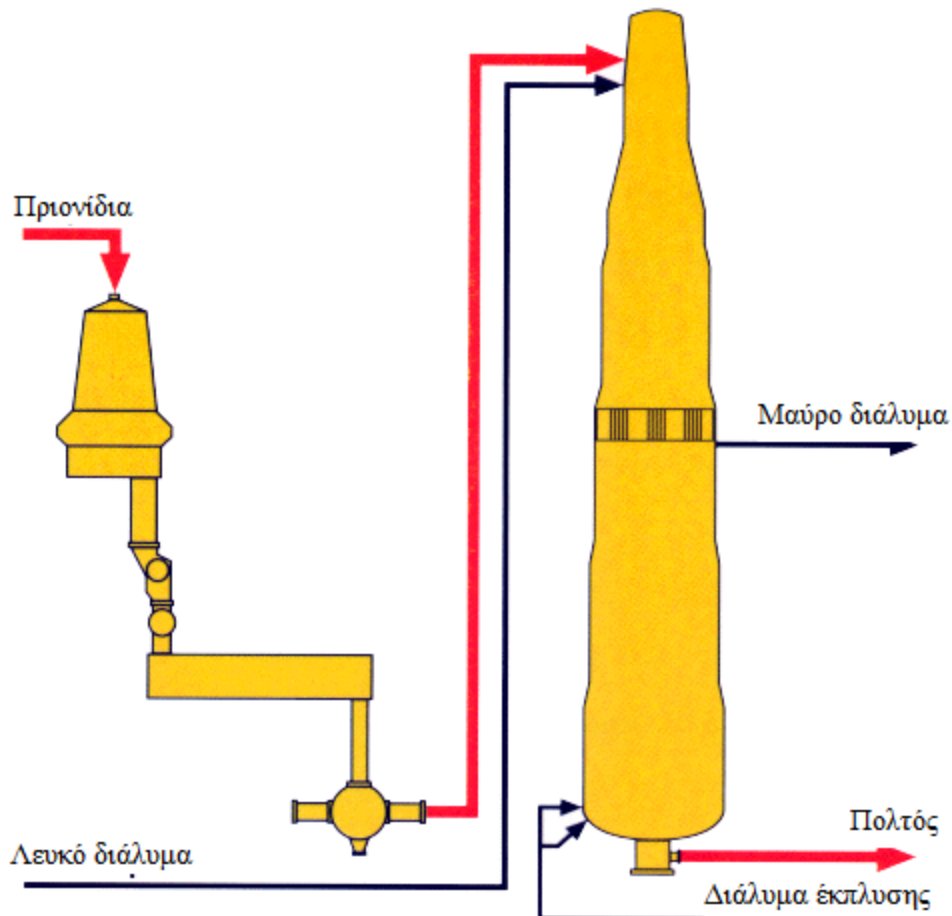
Στην διαδικασία “αφέψησης” συμβαίνει η απομάκρυνση λιγνίνης. Εκεί τα πριονίδια αναμειγνύονται με ένα λευκό διάλυμα (διάλυμα NaOH και Na₂S), θερμαίνονται για να αυξήσουν τον ρυθμό αντίδρασης και μετά διασπώνται σε ίνες με “έκρηξη”, υποβάλλοντάς τα σε μία ξαφνική μείωση πίεσης. Τυπικά 150 kg NaOH και 50 kg Na₂S απαιτούνται για ένα τόνο ξηρού ξύλου. Ο χρόνος και η θερμοκρασία μπορούν να ρυθμιστούν, αλλά για την επίτευξη λογικών χρόνων βρασμού είναι απαραίτητο οι θερμοκρασίες να είναι 150 – 165 °C, και έτσι χρησιμοποιούνται βραστήρες πίεσης. Όμως, αν η θερμοκρασία είναι πολύ υψηλή, τότε τα πριονίδια απολιγνοποιούνται άνισα, γεγονός το οποίο είναι ανεπιθύμητο, αφού πρέπει να επιτευχθεί μία ισορροπία.

Ο βαθμός απολιγνίνωσης είναι η πιο σημαντική παράμετρος για την ποιότητα του πολτού και εκφράζεται με τον **αριθμό Κάπα**, που είναι ανάλογος με την ποσότητα λιγνίνης που απομένει στον βρασμένο πολτό.

Υπάρχουν δύο διαφορετικά συστήματα βρασμού: σε τμήματα και συνεχή. Στην αφέψηση κατά τμήματα, τα πριονίδια και το λευκό διάλυμα αποθηκεύονται σε ένα δοχείο πίεσης και μετά θερμαίνονται με ατμό μέχρι μία δεδομένη θερμοκρασία για δεδομένο χρόνο. Όταν η σωστή απολιγνίνωση επιτυγχάνεται, το μίγμα “εκρήγνυται” (η πίεση ξαφνικά απελευθερώνεται έτσι ώστε τα αποστειρωμένα πριονίδια να διασπώνται σε ίνες). Στην συνεχή διεργασία, πριονίδια και λευκό διάλυμα τροφοδοτούν συνεχώς ένα δοχείο πίεσης. Τα πριονίδια μετακινούνται προς τα κάτω στην δεξαμενή χώνευσης (Σχήμα 2.15) λόγω βαρύτητας για να εκκενωθούν τελικά από το κάτω μέρος του δοχείου. Ο χρόνος αποστείρωσης δεν διαφέρει σε αυτήν την περίπτωση (τίθεται από τον ρυθμό παραγωγής) και μόνο η θερμοκρασία και το χημικό φορτίο ελέγχονται.

Η πρόκληση είναι να αφαιρεθεί τόση λιγνίνη όσο είναι δυνατόν χωρίς να αποδομείται η κυτταρίνη και χωρίς να μειώνεται η απόδοση. Είναι γνωστό ότι οι συγκεντρώσεις NaOH, Na₂S και διαλυμένης λιγνίνης κατά την διάρκεια διαφόρων φάσεων απολιγνίνωσης είναι σημαντικές για την αντοχή του πολτού. Γενικά, είναι επιθυμητό να υπάρχει υψηλή συγκέντρωση θείου στην έναρξη της αποστείρωσης, χαμηλή συγκέντρωση λιγνίνης στην υγρή φάση προς το τέλος της αποστείρωσης, και μία ομοιόμορφη συγκέντρωση αλκάλιου σε όλη την διάρκεια της αποστείρωσης. (European Commission, Δεκέμβριος 2001)

Σχήμα 2.15. Συνεχής χωνευτής



Πηγή: European Commission, Δεκέμβριος 2001

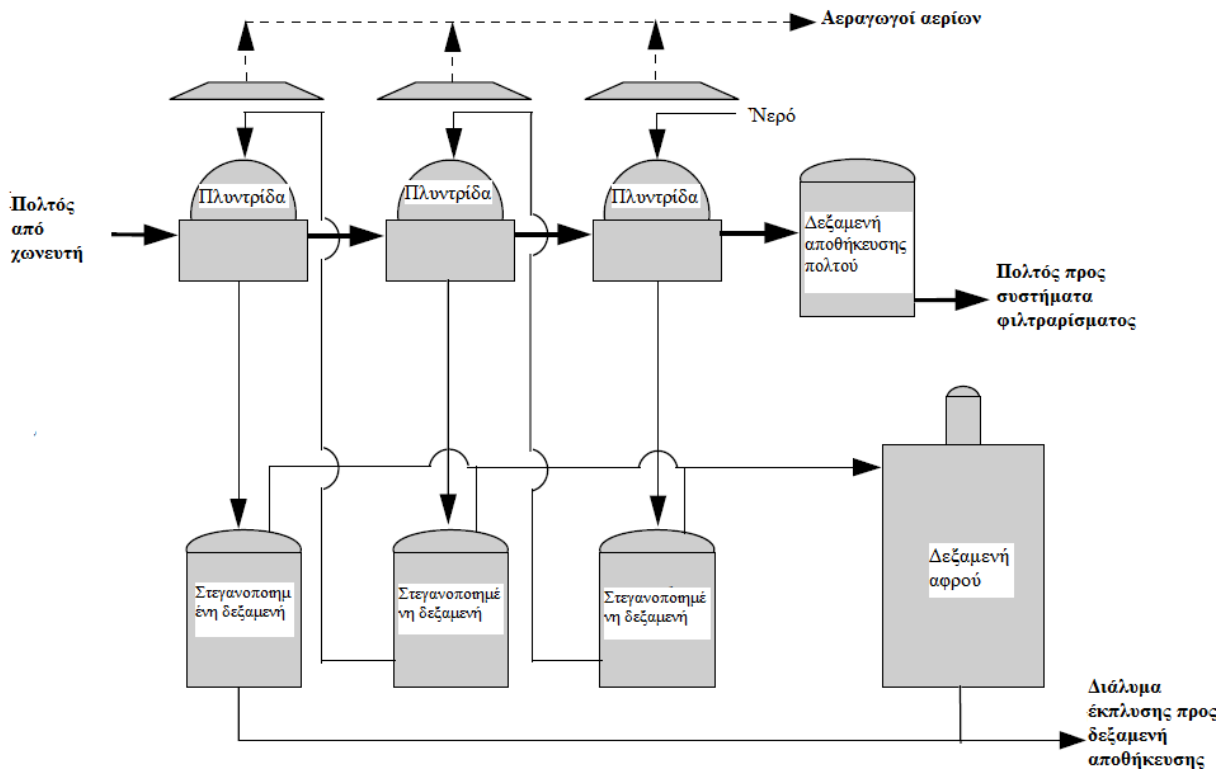
3.4.2.3 Έκπλυση πολτού

Εξαιτίας των υψηλών ποσοτήτων χημικών ουσιών που χρησιμοποιούνται στην αποστείρωση ξύλου, η ανάκτησή τους είναι σημαντική. Η διαδικασία όπου οι χημικές ουσίες διαχωρίζονται από τον αποστειρωμένο πολτό ονομάζεται *έκπλυση*. Μία καλή απομάκρυνση χημικών ουσιών (ανόργανων και οργανικών) είναι απαραίτητη για διάφορους λόγους:

- Οι διαλυμένες χημικές ουσίες παρεμβαίνουν στην επεξεργασία πολτού.
- Είναι ακριβές στην αντικατάσταση.
- Οι χημικές ουσίες (ειδικά η διαλυμένη λιγνίνη) είναι καταστροφική για το περιβάλλον.

Υπάρχουν πολλοί τύποι μηχανών για την πλύση πολτού. Οι περισσότεροι βασίζονται στην εκτόπιση των διαλυμένων στερεών ουσιών (ανόργανων και οργανικών) με ζεστό νερό, αλλά κάποιοι χρησιμοποιούν πίεση για να αφαιρέσουν τις χημικές ουσίες με κάποιο υγρό. Μία παλιά, αλλά ακόμα συνηθισμένη μέθοδος είναι η χρήση ενός τυμπάνου, καλυμμένου με συρμάτινο πλέγμα, που περιστρέφεται σε ένα αραιωμένο εναιώρημα ιών. Οι ίνες σχηματίζουν ένα στρώμα στο τυμπάνο, στο οποίο ψεκάζεται ζεστό νερό. Το Σχήμα 2.16 δείχνει ένα τυπικό σύστημα έκπλυσης με περιστροφικές πλυντρίδες.

Σχήμα 2.16. Σύστημα έκπλυσης με περιστροφικές πλυντρίδες

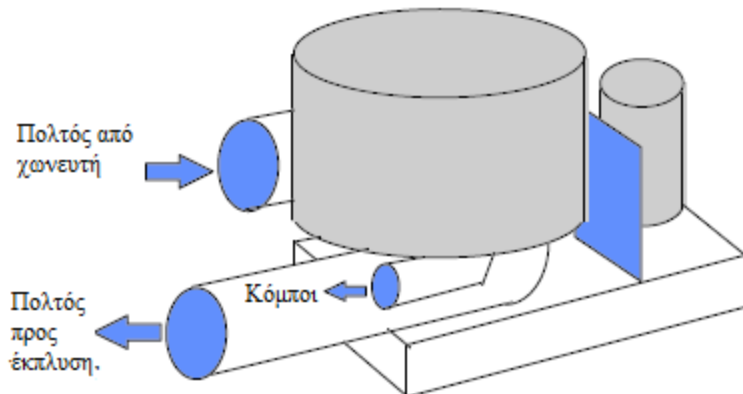


Πηγή: United States Environmental Protection Agency, Σεπτέμβριος 2001

3.4.4.4 Φιλτράρισμα πολτού

Εκτός από ίνες, ο αποστειρωμένος πολτός περιλαμβάνει μερικώς άβραστες δέσμες ινών ή κόμπους. Σύγχρονες αποστειρωτικές διεργασίες (μαζί με καλό φιλτράρισμα πριονιδιών για την επίτευξη σταθερού πάχους) ελέγχουν σωστά την απολιγνίνωση και παράγουν λιγότερα “απορρίμματα”. Κόμποι και σκίζες αφαιρούνται, περνώντας τον πολτό από κόσκινα με κατάλληλες οπές και αυλακώσεις. Το Σχήμα 2.17 δείχνει μία τυπική μηχανή απομάκρυνσης ινών με κόμπους.

Σχήμα 2.17. Μηχανή απομάκρυνσης ινών με κόμπους

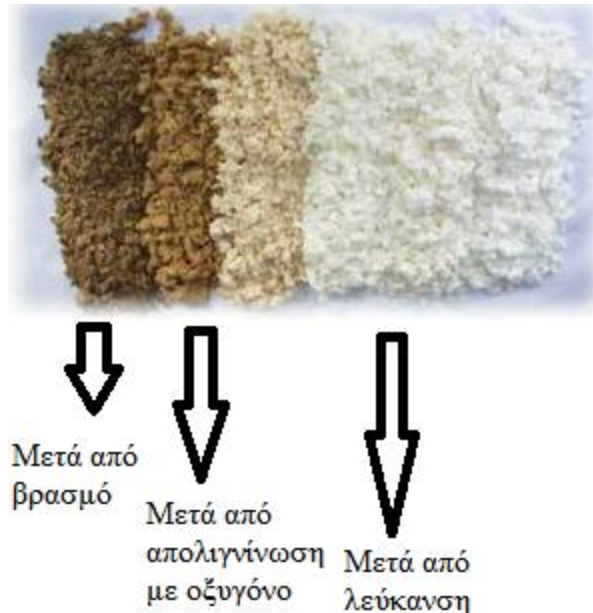


Πηγή: United States Environmental Protection Agency, Σεπτέμβριος 2001

3.4.3.5 Λεύκανση

Ο πολτός που παράγεται από την διεργασία Kraft είναι χρώματος καφέ. Όμως, μία μεγάλη αναλογία του πολτού αυτού χρησιμοποιείται για λευκά ή χρωματιστά χαρτιά όπως χαρτί τύπωσης ή γραφής, και έτσι ο πολτός πρέπει να λευκανθεί (Εικόνα 2.7).

Εικόνα 2.7. Βαθμός αφαίρεσης χρώματος στον πολτό

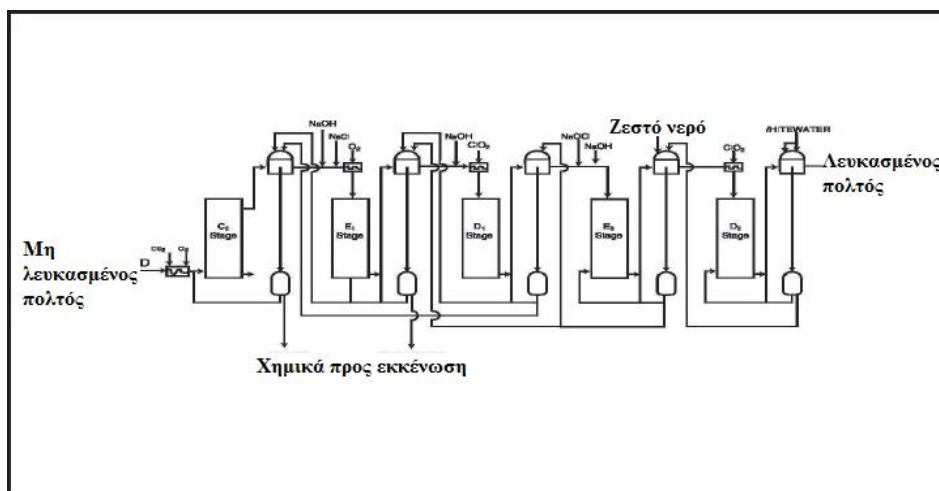


Πηγή: United States Environmental Protection Agency, Σεπτέμβριος 2001

Η λεύκανση περιλαμβάνει την αφαίρεση όλης της λιγνίνης που παραμένει μετά την αποστείρωση, αφού η λιγνίνη περιέχει τις ομάδες ουσιών που προκαλούν το χρώμα του πολτού να είναι καφέ (Σχήμα 2.18).

Για τη μέτρηση της περιεκτικότητας λιγνίνης στον πολτό, ένας δείκτης που ονομάζεται αριθμός Κάπα χρησιμοποιείται και είναι ανάλογος με την περιεκτικότητα λιγνίνης. Ο πολτός από μαλακή ξυλεία μετά την δεξαμενή χώνευσης έχει αριθμό Κάπα 20 – 35 και 15 – 20 από σκληρή (η σκληρή ξυλεία περιέχει λιγότερη λιγνίνη και μπορεί να αποστειρωθεί με μικρότερο αριθμό Κάπα).

Σχήμα 2.18. Λεύκανση



Πηγή: United States Environmental Protection Agency, Σεπτέμβριος 2001

3.4.3.6 Προετοιμασία στοκ

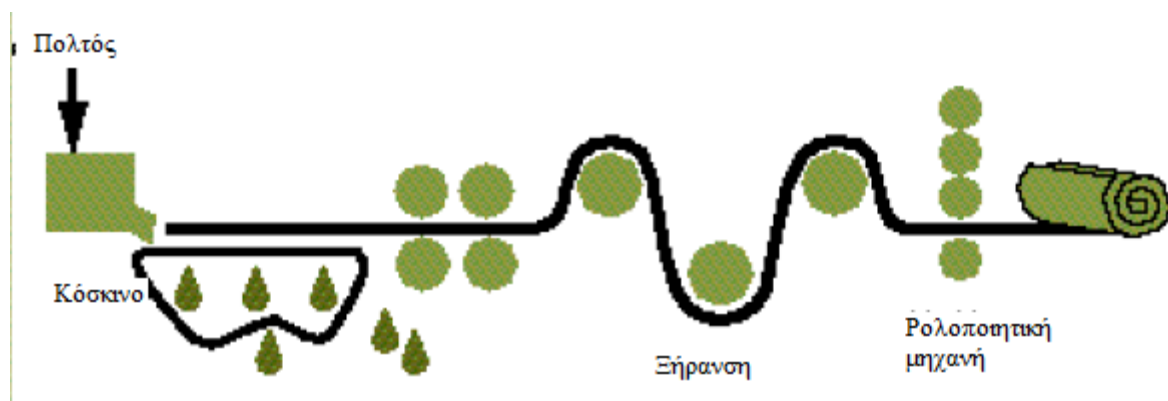
Σε αυτό το τελικό στάδιο, ο πολτός συγκεντρώνεται σε στοκ για την κατασκευή χαρτιού. Ο εμπορικός πολτός, που στέλνεται σε μύλους χαρτιού ή χαρτονιού, επεξεργάζεται λίγο, ή και καθόλου σε αυτό το στάδιο. Η επεξεργασία περιλαμβάνει ανάμιξη του πολτού ανάλογα με το επιθυμητό χάρτινο προϊόν, διασπορά στο νερό, χτύπημα και τριβή για την πρόσθεση πυκνότητας και αντοχής, και πρόσθεση κάποιων απαραίτητων υγρών προσθετικών. Αυτά τα προσθετικά χρησιμοποιούνται για να δημιουργήσουν χάρτινα προϊόντα με ειδικές ιδιότητες ή για να διευκολύνουν τη διεργασία κατασκευής χαρτιού. Τα υγρά προσθετικά περιλαμβάνουν ρητίνες και κεριά για υδροαπωθητικότητα, πληρωτικά υλικά όπως άργιλο, πυρίτιο, τάλκη, ανόργανες / οργανικές βαφές για χρωματισμό, και συγκεκριμένα ανόργανα χημικά (πχ διοξείδιο του τιτανίου) για βελτιωμένη υφή, ποιότητα τύπωσης, αδιαφάνεια και ευκρίνεια.

3.4.3.7 Κατασκευή χαρτιού

Η κατασκευή χαρτιού είναι η διαδικασία όπου οι ίνες πολτού επεξεργάζονται μηχανικά και χημικά, διαμορφώνονται σε ένα αραιωμένο εναιώρημα, απλώνονται σε μία επιφάνεια πλέγματος, το νερό αφαιρείται με αναρρόφηση, και η δέσμη από ίνες κυτταρίνης που προκύπτει πιέζεται και ξηραίνεται για την διαμόρφωση χαρτιού. Στο Σχήμα 2.19 εμφανίζονται τα βήματα για την παραγωγή χαρτιού.

Η μηχανική επεξεργασία της ίνας συχνά γίνεται περνώντας την από κινούμενες χαλύβδινες μπάρες που προσδένονται σε περιστροφικούς κινούμενους δίσκους, τους λεγόμενους δισκοτριβείς. Αυτή η επεξεργασία έχει δύο αποτελέσματα : κονταίνει την ίνα και την ινιδίζει. Αυτή η πράξη αυξάνει την επιφάνεια, και καθώς οι ίνες συνδέονται μεταξύ τους στο φύλλο χαρτιού με δεσμούς υδρογόνου, η αυξημένη επιφάνεια ενισχύει αρκετά την σύνδεση και την αντοχή του χαρτιού. Η αντοχή αυτή εξαρτάται από την αντοχή κάθε μίας ίνας και των δεσμών μεταξύ τους. Το τελευταίο είναι συχνά ο περιοριστικός παράγοντας. Η τριβή αυξάνει την σύνδεση των ινών κατά της αντοχής κάθε ίνας, αλλά το τελικό αποτέλεσμα είναι η συνολική αύξηση της αντοχής του χαρτιού. Η πίεση και το καλανδράρισμα (πέρασμα από κυλίνδρους) αυξάνει την πυκνότητα και προωθεί την στιλπνότητα.

Σχήμα 2.19. Μηχανή χαρτιού



Πηγή: United States Environmental Protection Agency, Σεπτέμβριος 2001

Υπάρχουν δύο τύποι μονάδων παραγωγής χαρτιού. Η μία μονάδα μπορεί να δέχεται ως πρώτη ύλη επεξεργασμένες κυβέτες χαρτιού – χαρτονιού, πλούσιες σε ίνες, ενώ η άλλη δέχεται ως πρώτη ύλη χρησιμοποιημένα πακέτα χαρτοκιβωτίων ή οποιοδήποτε είδος χαρτιού προς ανακύκλωση.

Για την πρώτη μονάδα παραγωγής χαρτιού, η πρώτη ύλη είναι κυβέτες χαρτιού (Εικόνα 2.8), πλούσιες σε ίνες (ονομάζονται και χαρτομάζα).

Εικόνα 2.8. Κυβέτες χαρτιού που χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη



Πηγή: United States Environmental Protection Agency, Σεπτέμβριος 2001

Ακολούθως, οι κυβέτες αυτές αλέθονται στη δεξαμενή της μηχανής (Εικόνα 2.9) με μεγάλες ποσότητες νερού για να διαχωριστούν οι ίνες. Ο πολτός που σχηματίζεται είναι τύπου CTMP (Chemothermomechanical pulp – χημοθερμομηχανικός πολτός), αφού παράγεται μέσω χημικής, θερμικής και μηχανικής κατεργασίας. Προστίθενται στο μίγμα χημικές ουσίες (αποαφριστικά, χρωστικές, λευκαντικά, μικροβιοκτόνα κτλ). Το ομογενές μίγμα που έχει σχηματιστεί περνά από μεταλλικά πλέγματα μεγάλου μήκους, όπου μεγάλη ποσότητα νερού απομακρύνεται, επιτρέποντας στις ίνες να σχηματίσουν ένα επίπεδο φύλλο (υγρασίας 80 – 86%). Στη συνέχεια, το φύλλο αυτό περνά από κυλινδρικά θερμικά πλέγματα, όπου υπό υψηλή πίεση και θερμοκρασία ξηραίνεται περαιτέρω. Οδηγείται στη μηχανή περιτύλιξης και κοπής (Εικόνα 2.10) όπου θα κοπεί σε ρολά χαρτιού συγκεκριμένου βάρους, τα οποία θα οδηγηθούν στη μεταποιητική μηχανή για παραγωγή του τελικού προϊόντος. Το ρολό αποτελείται από το χαρτί και ένα κυλινδρικό πυρήνα από χαρτόνι. Η υγρασία του χαρτιού στο ρολό είναι 6 – 6,5%. Η διαδικασία παραγωγής φαίνεται στο Σχήμα 2.20

Εικόνα 2.9. Ρολοποιητική μηχανή χαρτιού

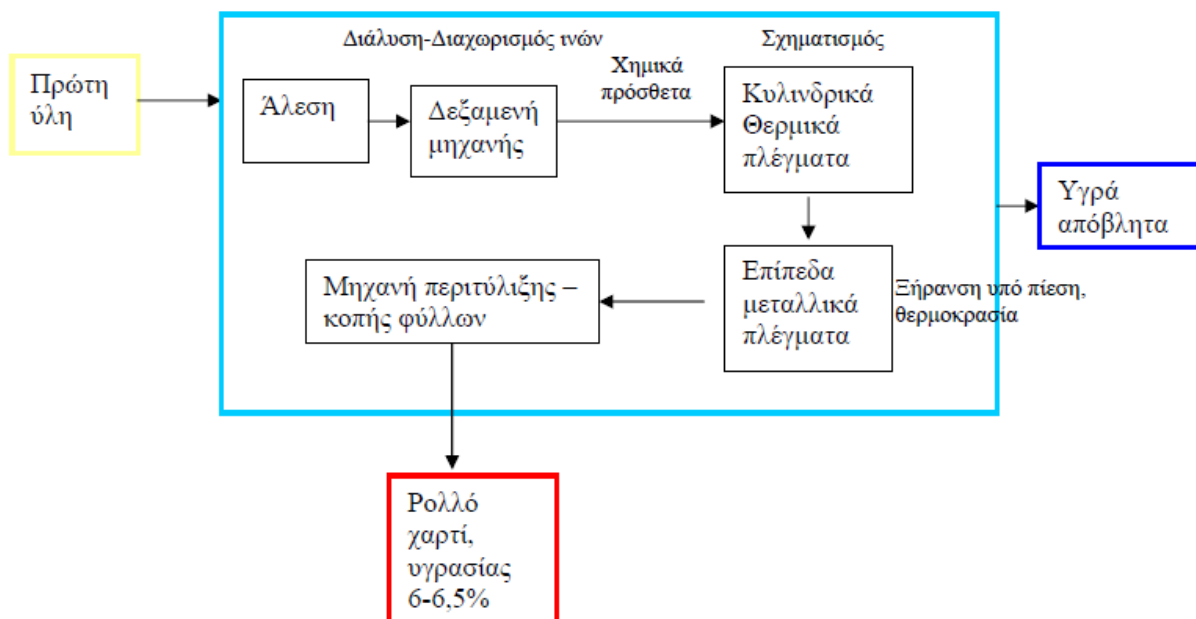


Εικόνα 2.10. Μηχανή περιτύλιξης χαρτιού



Πηγή: United States Environmental Protection Agency, Σεπτέμβριος 2001

Σχήμα 2.20. Διαδικασία παραγωγής χαρτιού με την πρώτη μέθοδο



Πηγή: United States Environmental Protection Agency, Σεπτέμβριος 2001

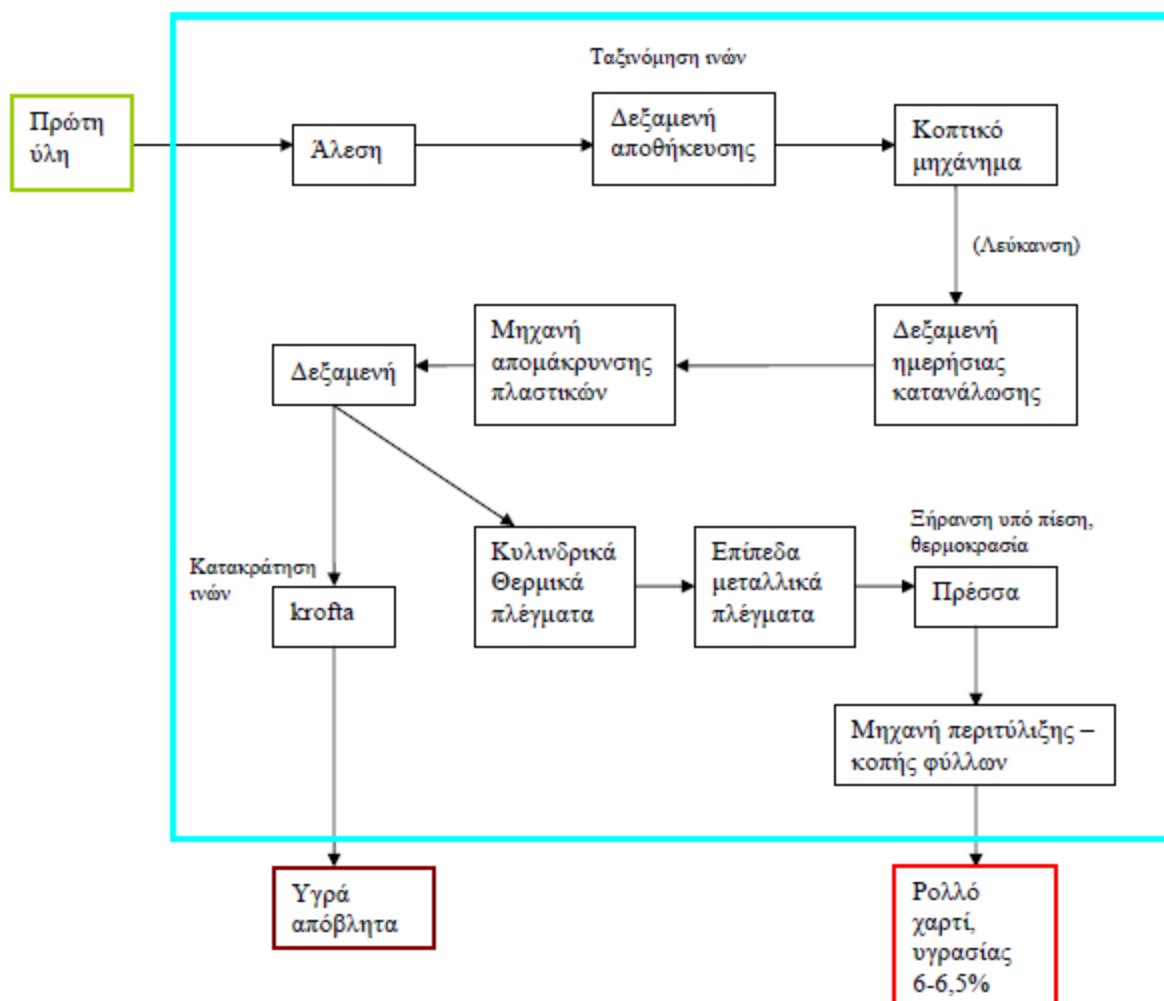
Η δεύτερη μέθοδος παραγωγής χαρτιού είναι πιο πολύπλοκη, επειδή η πρώτη ύλη είναι ανεπεξέργαστη και περιέχει πολλές ακαθαρσίες και ξένα σώματα (Εικόνα 2.11). Η διαδικασία είναι παρόμοια με την προηγούμενη, εκτός από τα στάδια της απομάκρυνσης μεταλλικών ξένων σωμάτων. Το στάδιο της λεύκανσης είναι προαιρετικό. Η διαδικασία εμφανίζεται στο Σχήμα 2.21.

Εικόνα 2.11. Πρώτη ύλη στη δεύτερη μέθοδο παραγωγής χαρτιού



Πηγή: United States Environmental Protection Agency, Σεπτέμβριος 2001

Σχήμα 2.21. Διαδικασία παραγωγής χαρτιού με τη δεύτερη μέθοδο



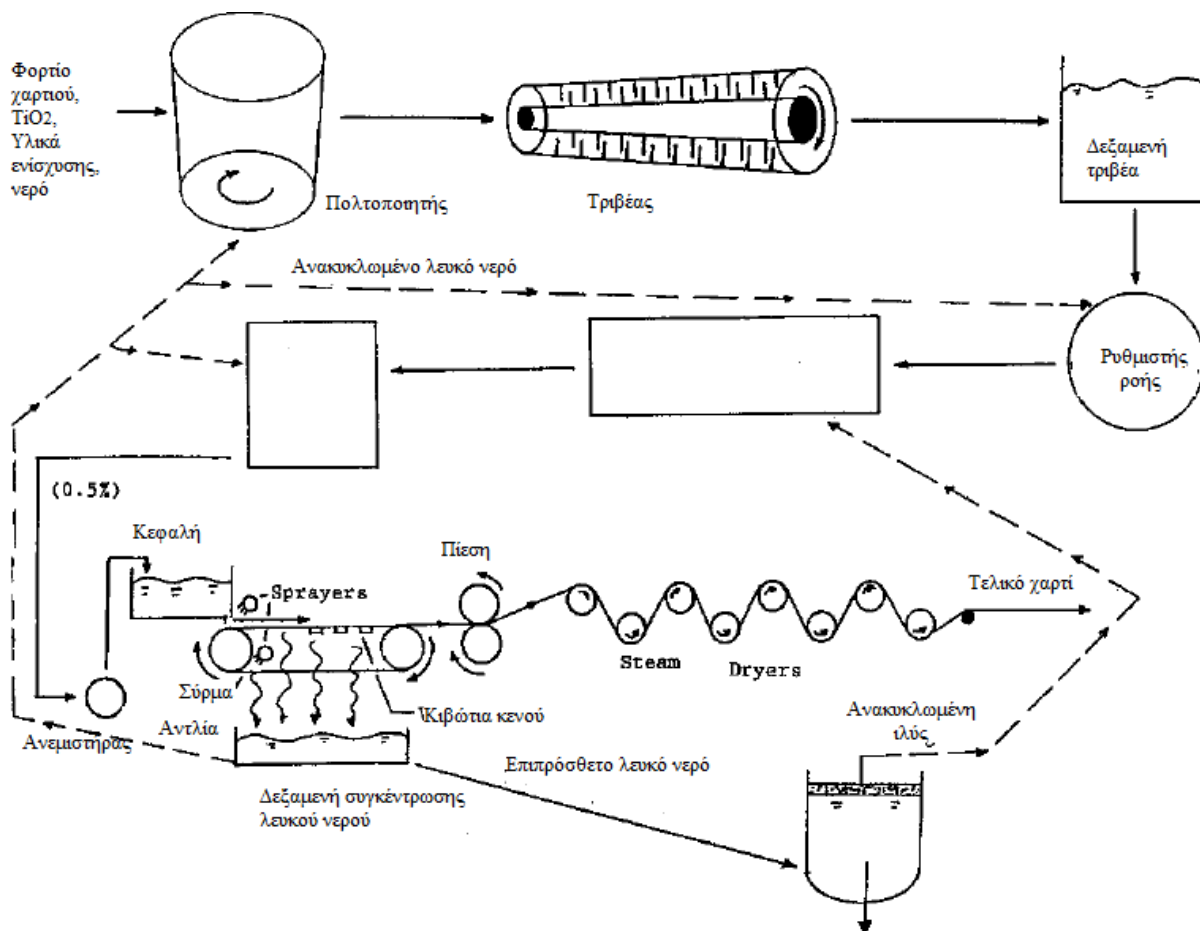
Πηγή: United States Environmental Protection Agency, Σεπτέμβριος 2001

Όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω ο σχηματισμός χαρτιού συμβαίνει σε δύο διαφορετικές μηχανές – τη μηχανή Fourdrinier ή την κυλινδρική.

3.4.3.7.1 Μηχανή Fourdrinier

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.22, ξηρά φύλλα πολτού εισέρχονται στο νερό και αναμιγνύονται με άλλες ουσίες. Έπειτα, αυτό το φορτίο επεξεργάζεται μηχανικά σε κτυπητές ή συνεχείς τριβείς. Οι τριβείς μπορούν να αποτελούνται από δίσκους – το φορτίο χαρτιού περνά ανάμεσα από δύο ραβδωτές επιφάνειες. Οι ίνες διαβρέχονται και κόβονται μέχρι να παράγουν καλή κατανομή στο φύλλο και ένα χαρτί επιθυμητής αντοχής.

Σχήμα 2.22. Διάγραμμα ροής – Αρχή Fourdrinier

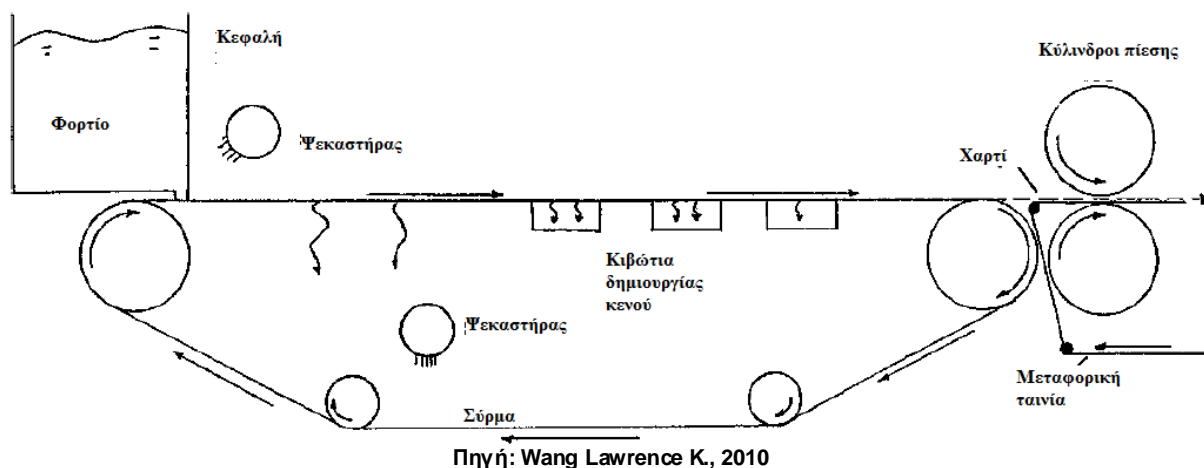


Πηγή: United States Environmental Protection Agency, Σεπτέμβριος 2001

Από τον τριβέα, το φορτίο περνά μέσα από μία σειρά δεξαμενών συγκράτησης, αναφερόμενες ως “σκάφες”. Ο σκοπός τους είναι να ρυθμίσουν τη ροή και τη συγκέντρωση των ινών στον πολτό. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.22, η ροή του φορτίου γενικά προχωρά από τον τριβέα στη δεξαμενή, στη μηχανή δεξαμενής και στο κιβώτιο πολτοποιωρήματος.

Με τον εξοπλισμό Fourdrinier, το φορτίο εισέρχεται στο κιβώτιο κεφαλής, έναν κατανεμητή ροής που ρυθμίζει τη ροή του (Σχήμα 2.23). Μετά ρέει στο σύρμα μέσω μιας στενής περιοχής κατά μήκος της βάσης της δεξαμενής που ονομάζεται δίσκος. Στο σύρμα, κάποιο από το φορτίο που έχει πυκνότητα στερεού 0.5%, απορροφάται μέσω του συρματινού πλέγματος λόγω βαρύτητας. Το σύρμα έπειτα περνά πάνω από κουτιά κενού που τραβάνε περισσότερο νερό μέσω του σύρματος. Ένας κύλινδρος τοποθέτησης με αναρρόφηση μεταφέρει το στρώμα ινών από το σύρμα σε μεταφορική ταινία, που το περνά μέσω κυλίνδρων οι οποίοι πιέζοντας το, το ξηραίνουν περισσότερο. Όταν το χαρτί φεύγει από το “υγρό τέλος” της διεργασίας, έχει πυκνότητα στερεών 35 – 40%. Το σύρμα, χωρίς τις ίνες, περνά μέσα από σειρά ψεκαστήρων που το καθαρίζουν από κάποια εναπομείναντα φορτία. Αυτό το νερό συλλέγεται και προστίθεται στο λευκό νερό. Το καθαρισμένο σύρμα επιστρέφει στην κεφαλή και όλη η διαδικασία επαναλαμβάνεται. (Wang Lawrence K., 2010)

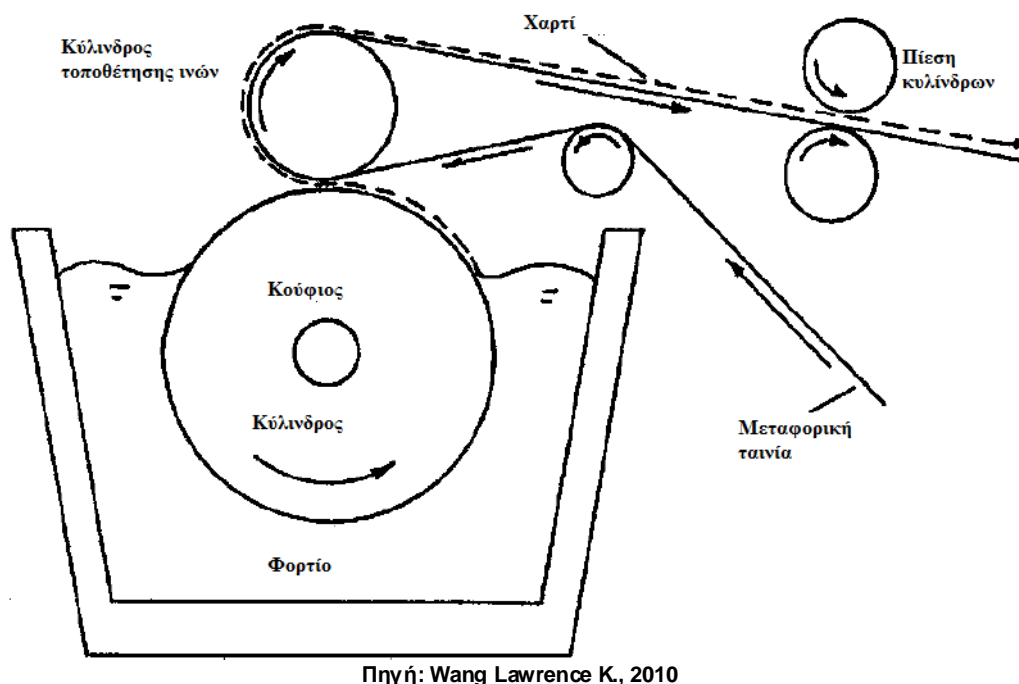
Σχήμα 2.23. Μηχανή Fourdrinier



3.4.3.7.2 Κυλινδρική μηχανή

Η κυλινδρική μηχανή λειτουργεί διαφορετικά. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.24, ένας διάτρητος κούφιος κύλινδρος σφικτά καλυμμένος από ένα συρματόπλεγμα περιστρέφεται σε μια δεξαμενή νερού και ινών. Το νερό εξέρχεται μέσω κόσκινου και τοποθετεί τις ίνες. Το στρώμα τοποθετείται σε μεταφορική ταινία που το περνά από πιέσεις και διάφορες λειτουργίες. (Wang Lawrence K., 2010)

Σχήμα 2.24. Κυλινδρική μηχανή



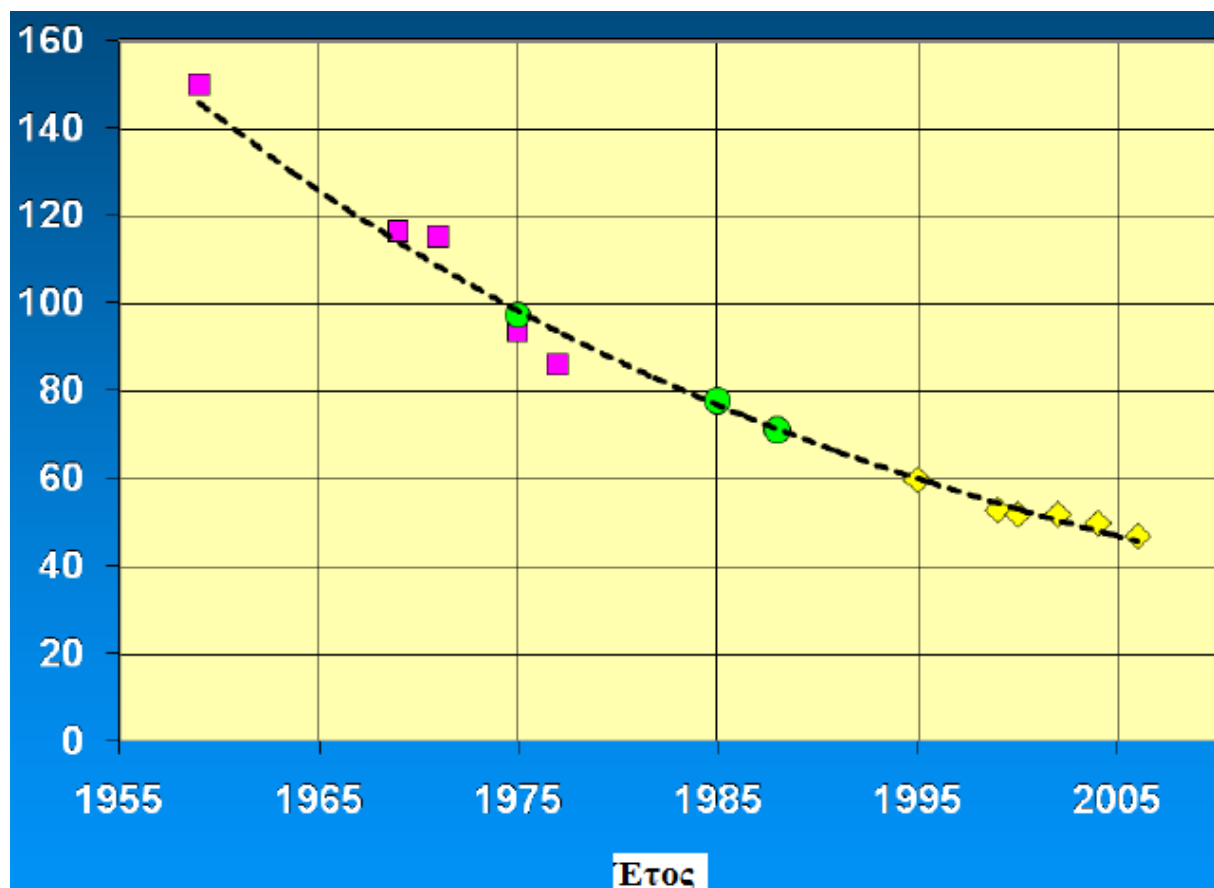
Ο εξοπλισμός ξήρανσης αποτελείται από μια σειρά μεταλλικών κούφιων τυμπάνων ζεσταμένων σε ατμό. Η μεταφορική ταινία κρατά το χαρτί κόντρα στο τύμπανο για να μεγιστοποιήσει την επαφή ανάμεσα στον ξηραντικό κύλινδρο και το χαρτί. Αφού το χαρτί ξηραίνεται, περνά από καλεντράρισμα και επικαλύψεις που το λειαίνουν και του δίνουν μοναδικές ιδιότητες επιφάνειας.

4 Τα απόβλητα της χαρτοβιομηχανίας

4.1 Περιβαλλοντικά θέματα της χαρτοβιομηχανίας

Η χαρτοβιομηχανία ιστορικά θεωρείται ένας σημαντικός καταναλωτής φυσικών πηγών (ξύλο) και ενέργειας (ορυκτά καύσιμα, ηλεκτρισμός), συμπεριλαμβανομένου του νερού, και συνεισφέρει αρκετά στις εκκενώσεις ρύπων στο περιβάλλον. Όμως, σε περιοχές που έχουν καλά αναπτυγμένη χαρτοβιομηχανία, μέσω ενός μεγάλου αριθμού περιβαλλοντικών μέτρων για το βελτιωμένο έλεγχο εκπομπών, εσωτερικών όπως και εξωτερικών, οι εκπομπές τυπικά έχουν μειωθεί κατά 80 – 90% ή και περισσότερο από το 1980 (Σχήμα 3.1).

Σχήμα 3.1. Μέση τιμή εκκενώσεων αποβλήτων ανά χρόνο από βιομηχανία πολτού και χάρτου



Πηγή: Wang Lawrence K., 2010

Για τους μύλους πολτού η κύρια πρώτη ύλη είναι μία ανανεώσιμη πηγή (ξύλο). Σε κάποιες χώρες μέθοδοι βιώσιμων δασών εφαρμόζονται. Το 1996 η συνολική κατανάλωση ξύλου που χρησιμοποιείται για πολτοποίηση στη Δυτική Ευρώπη ήταν 119.5 εκατομμύρια m^3 . Η κατανάλωση πρώτων υλών για την κατασκευή χαρτιού αντιστοιχεί σε 45.9% ξύλο, 39.3% ανακτώμενο χαρτί, 14.3% μη – ινώδη υλικά και 0.5% άλλα υλικά.

Υπάρχει εξέλιξη στο κλείσιμο των κυκλωμάτων νερού στους μύλους πολτού και χάρτου και μία περαιτέρω μείωση εκκενώσεων μπορεί να επιτευχθεί. Όμως, σήμερα δεν υπάρχουν μύλοι που να λειτουργούν συνεχώς και να ανακτούν όλα τα απόβλητα λεύκανσης.

Πρόσφατα, οι μύλοι πολτού προκάλεσαν σοβαρές εκπομπές θειούχων ενώσεων αλλά τα τελευταία χρόνια κυρίως οι συγκεκριμένες αέριες εκπομπές έχουν μειωθεί σημαντικά λόγω μεγάλων

εξελίξεων στην τεχνολογία διεργασίας. Η ανακύκλωση των ινών χρησιμοποιημένου χαρτιού στη Δυτική Ευρώπη έχει φτάσει σε ένα προχωρημένο επίπεδο. Η ανάκτηση ενέργειας από απόβλητα κατασκευαστικών διεργασιών πολτού και χάρτου (απορρίμματα, ιλύς) είναι δυνατή και έτσι αποφεύγεται και το πρόβλημα εκκένωσης αποβλήτων. Αλλά υπάρχει ακόμα μεγάλη δυνατότητα για αυξημένη χρήση αποτελεσματικών τεχνικών στις μονάδες χαρτοβιομηχανίας. Για τη χημική πολτοποίηση δεν χρειάζεται εξωτερική ενέργεια αλλά η συνολική ζήτηση ενέργειας διεργασιών βρίσκεται ακόμα σε υψηλό επίπεδο. Η μηχανική πολτοποίηση χρειάζεται μεγάλη ποσότητα ενέργειας λόγω των ηλεκτρικών απαιτήσεων των μηχανών, όπως επίσης και η διεργασία ανάκτησης και κατασκευής χαρτιού. Αυτό προκαλείται από το γεγονός ότι για την κατασκευή χαρτιού η στερεή περιεκτικότητα σε ίνες και πιθανώς σε πληρωτικά υλικά πρέπει να φτάσει στο 95% στερεών μέσω πίεσης και ξήρανσης (εξάτμισης νερού).

Κατά την περίοδο πριν το 1970 – 1980 η χαρτοβιομηχανία προκάλεσε σημαντικές εκκενώσεις αποβλήτων σε υδάτινους δέκτες. Τα αποτελέσματα που παρατηρήθηκαν ήταν μερικές φορές δραματικά με έλλειψη οξυγόνου και θανάτους ψαριών. Από το τέλος της δεκαετίας του 1970 μέχρι και πρόσφατα, η κύρια έμφαση δίνεται στο ρόλο χλωριωμένων ενώσεων που σχηματίζονται στο σταθμό λεύκανσης. Διοξίνες και φουράνες είχαν παρατηρηθεί σε κάποια απόβλητα μύλων πολτού και η κοινή γνώμη εστιάστηκε στα επιβλαβή αποτελέσματα της λεύκανσης με χλώριο. Το ενδιαφέρον για τον πιθανό περιβαλλοντικό κίνδυνο από τη χρήση χλωρίου στους σταθμούς λεύκανσης έχει φέρει μία δραστηκή μείωση στη χρήση μοριακού χλωρίου ως χημικού λεύκανσης την τελευταία δεκαετία. Οι αρχές περιβαλλοντικού ελέγχου σε πολλές χώρες έχουν θέσει αυστηρούς περιορισμούς στις εκκενώσεις χλωριωμένων οργανικών ενώσεων που αναφέρονται ως ΑΟΧ στο υδάτινο περιβάλλον. Μία μείωση των ΑΟΧ επιτεύχθηκε με ένα συνδυασμό σημαντικών μέτρων: Η χρήση μοριακού χλωρίου έχει αντικατασταθεί ευρέως από διοξείδιο του χλωρίου και την εισαγωγή άλλων χημικών που περιέχουν οξυγόνο όπως μοριακό οξυγόνο, υπεροξείδιο και όζον. Λόγω της μεγάλης μείωσης της περιεκτικότητας σε χλώριο των αποβλήτων ένα κλείσιμο του συστήματος του μύλου και η ανακύκλωση των αποβλήτων λεύκανσης πίσω στο σύστημα χημικής ανάκτησης του μύλου έχει γίνει δυνατή. Η μείωση των χλωριωμένων και μη οργανικών ενώσεων στα απόβλητα μύλων πολτού έχει επιτευχθεί σε μεγάλη έκταση με μέτρα στις διεργασίες όπως για παράδειγμα: αυξημένη απολιγνίνωση πριν το σταθμό λεύκανσης με εκτεταμένο ή τροποποιημένο βρασμό και επιπρόσθετα στάδια οξυγόνου, αποτελεσματική έκπλυση κτλ. Άλλος ένας παράγοντας που συνεισφέρει στις μειωμένες εκπομπές των ΑΟΧ και των μη – χλωριωμένων τοξικών οργανικών ενώσεων στους υδάτινους δέκτες, ήταν η εγκατάσταση σταθμών εξωτερικής επεξεργασίας διάφορων σχεδίων.

Για τη συμμόρφωση με τις απαιτήσεις αγοράς και του περιβάλλοντος οι σημερινές τάσεις στη χαρτοβιομηχανία είναι προς το αυξημένο κλείσιμο των σταθμών λεύκανσης είτε χρησιμοποιώντας την ECF ή την TCF λεύκανση πολτού.

Στους μύλους πολτού μία αυξημένη επαναχρησιμοποίηση επεξεργασμένων νερών διεργασίας εφαρμόζοντας συστήματα προηγμένης επεξεργασίας αποβλήτων ενσωματωμένων στην παραγωγή θα επιτρέπεται. Οι εκκενώσεις αποβλήτων, ο περιβαλλοντικά φιλικός χειρισμός τους, η εξοικονόμηση και ανάκτηση ενέργειας αναμένονται να παραμείνουν επίσης μελλοντικές προτεραιότητες περιβαλλοντικών ενεργειών στη χαρτοβιομηχανία.

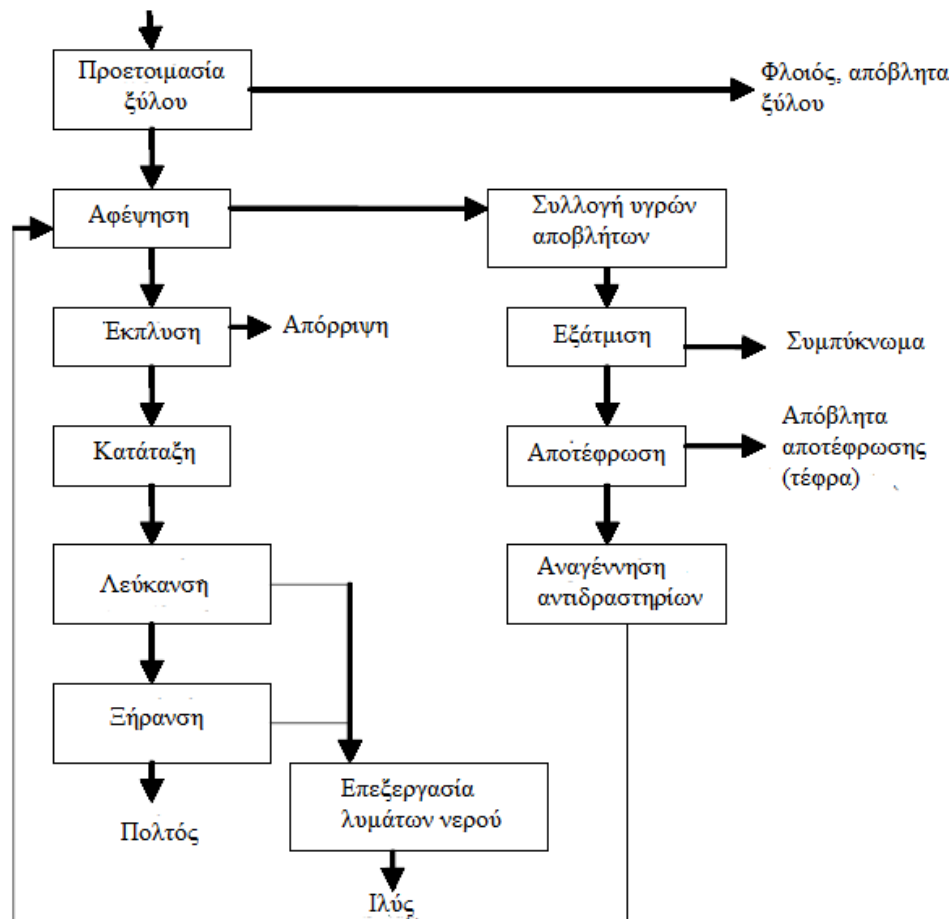
4.2 Ποσότητες παραγόμενων αποβλήτων

Παγκοσμίως 164059000 τόνοι πολτού κυτταρίνης παράγονται και 246507000 τόνοι χαρτιού και χαρτονιού επίσης. Στην Δυτική Ευρώπη, οι παραγωγές είναι 31640000 τόνοι κυτταρίνης και 64530000 τόνοι χαρτιού και χαρτονιού, στην Ανατολική Ευρώπη 9035000 τόνοι πολτού και 100072000 χαρτιού και χαρτονιού και για την Βόρεια Αμερική 82123000 τόνοι κυτταρίνης και

91323000 τόνοι χαρτιού και χαρτονιού. Αν και με διαφορετικό ρυθμό για τα διάφορα μέρη της Γης, η παραγωγή και κατανάλωση κυτταρίνης, χαρτιού και χαρτονιού συνεχώς αυξάνει.

Η σύνδεση ανάμεσα στην ποσότητα των προϊόντων και την ποσότητα των αποβλήτων υποδηλώνει την αύξηση των τελευταίων επίσης. Το είδος και η ποσότητα των παραγόμενων αποβλήτων είναι διαφορετικά και εξαρτώνται από την χρησιμοποιούμενη μέθοδο παραγωγής και την χωρητικότητα των συγκεκριμένων σταθμών. (Ince Bahar K.)

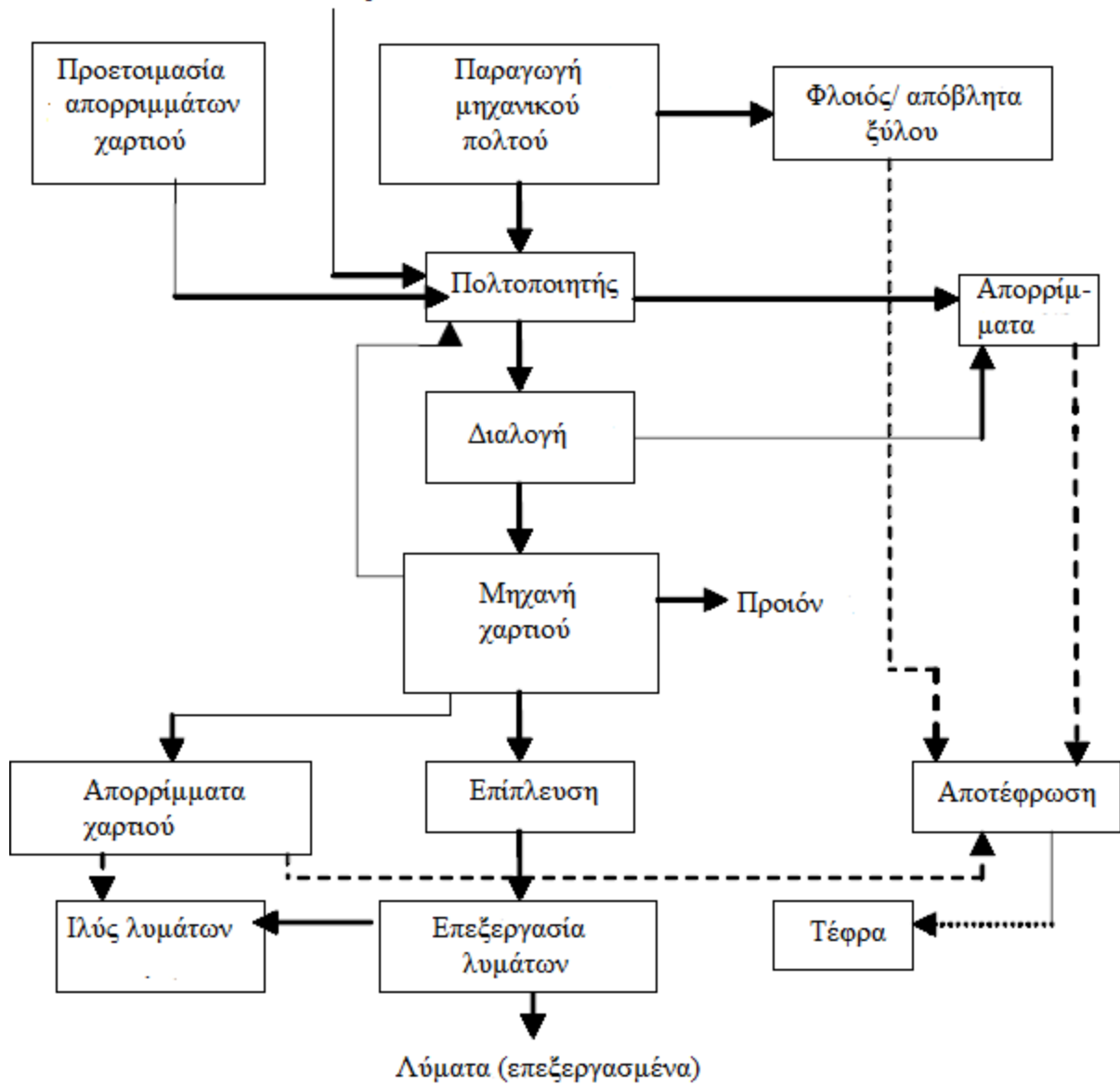
Σχήμα 3.2. Κύριο σχήμα παραγωγής εκπομπών από την παραγωγή πολτού Ξύλο (ξύλεια)



Πηγή: Ince Bahar K.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2, οι ξεχωριστές τεχνολογικές μονάδες παράγουν απόβλητα που αρχίζουν με φλοιούς ξύλου στο πρώτο στάδιο. Η βιομάζα των φλοιών και των λασπών είναι πιθανές δευτερογενείς πηγές πρώτων υλών και πηγών ενέργειας, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Το παραγόμενο συμπύκνωμα και η τέφρα έχουν επίσης δυναμικότητα ως δευτερογενείς πηγές πρώτων υλών. Τα παραγόμενα απόβλητα από την κατασκευή χαρτιού είναι παρόμοια (Σχήμα 3.3). (Ince Bahar K.)

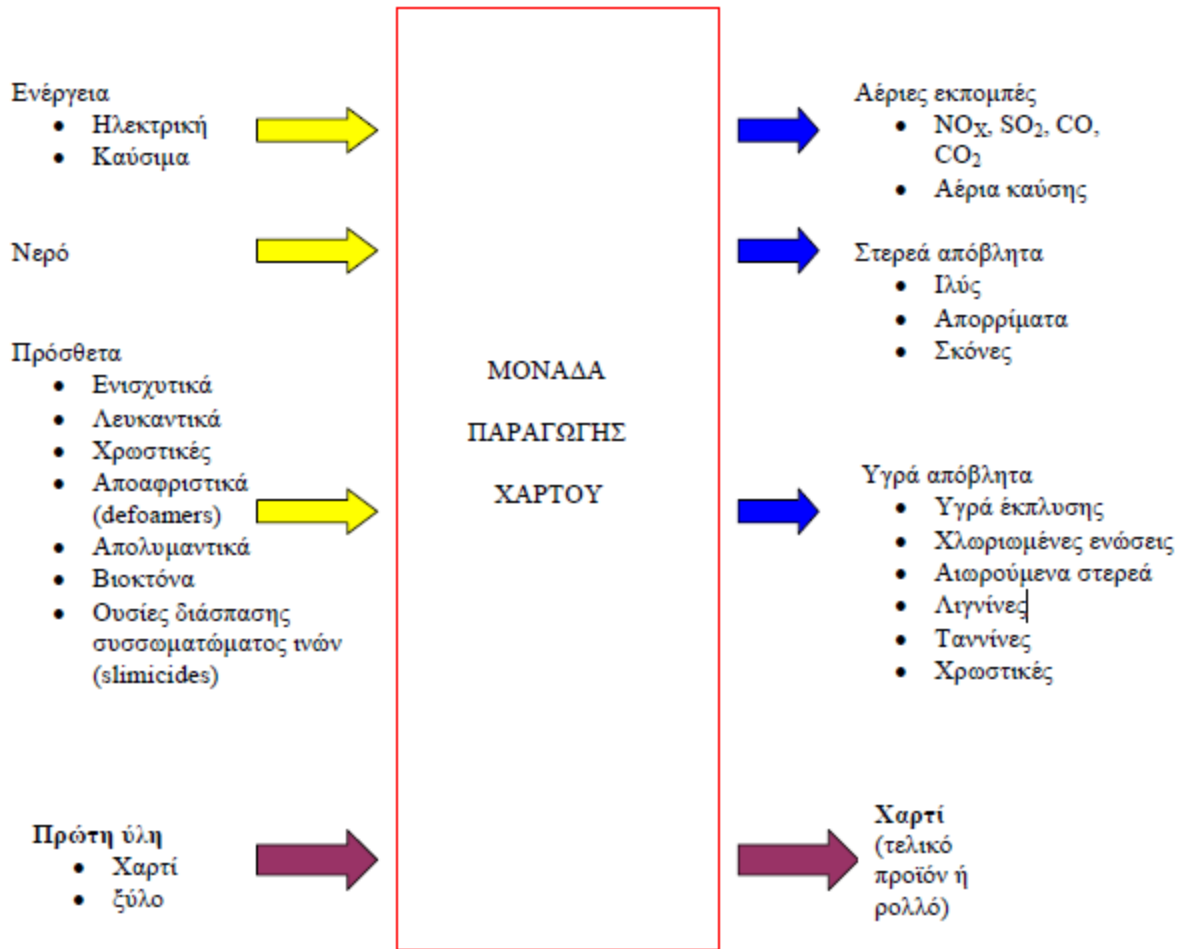
Σχήμα 3.3. Κύριο σχήμα παραγωγής εκπομπών από την παραγωγή χαρτιού



Πηγή: Ince Bahar K.

Στο Σχήμα 3.4, εμφανίζονται οι εισροές και οι εκροές σε μία βιομηχανία χάρτου, όπου εμφανίζονται όλα τα απόβλητα που θα αναλυθούν παρακάτω.

Σχήμα 3.4. Εισροές και εκροές σε βιομηχανία χάρτου



Πηγή: Wang Lawrence K., 2010

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τους επιστήμονες παρουσιάζει η μελέτη των υγρών αποβλήτων, τα οποία λόγω του αυξημένου οργανικού φορτίου, των χλωριωμένων ενώσεων, των αιωρούμενων στερεών και των πρόσθετων χημικών που περιέχουν, επιβαρύνουν τα υδάτινα οικοσυστήματα στα οποία καταλήγουν.

4.3 Αέρια απόβλητα

Ο Πίνακας 3.1 αποτελεί μία ανακεφαλαίωση των σημαντικών τύπων και πηγών των εκπομπών αέριων ρύπων από διάφορες διεργασίες πολτού και χάρτου.

Πίνακας 3.1. Συνηθισμένοι αέριοι ρύποι από διεργασίες πολτού και χάρτου

Πηγή	Είδος
Λέβητας ανάκτησης χημικών ουσιών	Αιωρούμενα σωματίδια
Πτητική τέφρα από καυστήρες	Χονδροειδή σωματίδια
Διάφορες λειτουργικές μύλων	Οξειδία του θείου
Πολτοποίηση Kraft	Ανηγμένα αέρια θείου
Βραστήρας ξύλου και εξάτμιση διαλύματος	Πτητικές οργανικές ενώσεις
Διεργασίες καύσης	Οξειδία αζώτου

Πηγή: Wang Lawrence K., 2010

Οι αέριες εκπομπές αποτελούνται από διοξείδιο του θείου, οξείδια αζώτου, διοξείδιο χλωρίου και ανηγμένα αέρια θείου. Οι δύο πρώτες δεν θεωρούνται πρόβλημα, και οι εκπομπές του διοξειδίου χλωρίου μπορούν να επαλειφθούν με καθαρισμό με κατάλληλα διαλύματα. Όμως, τα ανηγμένα αέρια θείου είναι ένα σημαντικό πρόβλημα, εξαιτίας της έντονης μυρωδιάς τους. Αυτή προκύπτει από μικρές εκκενώσεις θειώδους οξέος, μεθυλικής μερκαπτάνης, διμεθυλικών θειούχων ενώσεων και διμεθυλικών διθειούχων ενώσεων. Λέβητες ανάκτησης χρησιμοποιούνται ως κύρια πηγή των εκπομπών αυτών, αλλά η βελτίωση της τεχνολογίας εξάλειψε αυτό το πρόβλημα. Με συλλογή των θειούχων αερίων με διάφορους εξαερισμούς στον σταθμό και η αποτέφρωσή τους σε ασβεστοκάμινο ή ειδικό αποτεφρωτήρα έχουν μειώσει το θέμα των άσχημων οσμών.

Οι εκπομπές σκόνης είναι στη μορφή θειούχου νατρίου από το λέβητα ανάκτησης, ασβεστόσκονη από την ασβεστοκάμινο και ιπτάμενη τέφρα από τον λέβητα φλοιού. Όλες αυτές οι εκπομπές μπορούν να μειωθούν χρησιμοποιώντας αποτελεσματικά συστήματα καθαρισμού και συγκεκριμένα χρησιμοποιώντας ηλεκτρικούς διαχωριστές.

Οσμές από τις παραγωγικές διαδικασίες της χαρτοβιομηχανίας δεν δημιουργούνται σε κανονικές συνθήκες λειτουργίας. Προβλήματα οσμών προκύπτουν σε περιπτώσεις κακής λειτουργίας των εγκαταστάσεων βιολογικού καθαρισμού ή των διατάξεων επεξεργασίας υδάτων, καθώς και από την σήψη των ιζημάτων.

Η μεταφορά κορμών, η παραγωγή, φιλτράρισμα, μεταφορά και αποθήκευση πριονιδιών ξύλου όπως και οι δραστηριότητες αποφλοίωσης μπορούν να προκαλέσουν την εκπομπή συγκεκριμένων σωματιδίων, που είναι πολύ δύσκολο να μετρηθούν.

Πτητικές οργανικές ενώσεις μπορούν να προκύψουν από την προετοιμασία ξύλου και τη διεργασία βρασμού του για την παραγωγή πολτού, όπως και από την απολιγνίνωση με οξυγόνο. Κατά τη χημική ανάκτηση, και την εξάτμιση του νερού, αέριες πτητικές ενώσεις μπορεί να σχηματιστούν.

Επομένως, οι μετρήσεις εκπομπών στον αέρα αφορούν τα παρακάτω:

- Διοξείδιο του άνθρακα που προκύπτει από την πλήρη καύση του άνθρακα σε οργανική ύλη, την καύση βιομάζας και ορυκτών καυσίμων.
- Χλωροφόρμιο, ένας επικίνδυνος αέριος ρύπος, που κατηγοριοποιείται ως πιθανό ανθρώπινο καρκινογόνο.
- Σωματίδια που διασπείρονται στην ατμόσφαιρα κατά την καύση.
- Διοξείδιο του θείου και οξείδια του αζώτου, που προκύπτουν από την καύση καυσίμου στους λέβητες.
- Ολικά ανηγμένα θειικά ενώσεις που προκαλούν άσχημες οσμές.
- Πτητικές οργανικές ενώσεις, οι οποίες αποτελούν μία ευρεία τάξη οργανικών αερίων, όπως ατμοί από διαλύτες και βενζίνη. Ο έλεγχος αυτών των ενώσεων είναι σημαντικός γιατί αντιδρούν με οξείδια αζώτου για τη διαμόρφωση όζοντος στην ατμόσφαιρα.

Από το είδος των παραγωγικών διαδικασιών της χαρτοβιομηχανίας δεν παράγονται αερολύματα, εκτός από τα απαέρια των καυσίμων για παραγωγή ενέργειας ή θερμότητας. Χημικές ενώσεις εκπέμπονται στην ατμόσφαιρα ως αέρια ή σκόνη από πηγές ενέργειας και διεργασιών. Οι εκπομπές που συνδέονται με την ενέργεια προκύπτουν από την καύση του ξύλου και των ορυκτών καυσίμων και η ποσότητα τους εξαρτάται από το μίγμα καυσίμων που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας στο σταθμό. Σταθμοί που χρησιμοποιούν υδροηλεκτρικούς σταθμούς έχουν πολύ μικρές εκπομπές και αυτοί που χρησιμοποιούν ηλεκτρισμό παραγόμενο από φυσικό αέριο έχουν χαμηλότερες εκπομπές από αυτούς που ο ηλεκτρισμός παράγεται από πετρέλαιο ή κάρβουνο.

Οι σταθμοί απελευθερώνουν αέριους ρύπους από πηγές διεργασίας, όπως η πολτοποίηση, λεύκανση και από το σύστημα ανάκτησης χημικών ουσιών. Οι σταθμοί επεξεργασίας αποβλήτων παράγουν αέρια του θερμοκηπίου καθώς καταναλώνουν ενέργεια. Οι ρύποι που παράγονται, μπορούν να ελαχιστοποιηθούν και να επεξεργαστούν με διάφορες διεργασίες, όπως φυσικοχημικές, βιολογικές

κτλ. μεθόδους, οι οποίες μπορούν να επιλεγθούν ανάλογα τον τύπο του ρύπου και τις λειτουργικές παραμέτρους του συστήματος.

4.3.1 Οξείδια του θείου

Σε συνδυασμό με το νερό, το SO₂ είναι διαβρωτικό, επομένως η υγρή απόθεση (βροχή, χιόνι, ομίχλη κτλ) μπορεί να προκαλέσει σημαντικές συνέπειες στο περιβάλλον (φυτά, κτίρια κτλ). Οι άνθρωποι επίσης επηρεάζονται από το SO₂, επειδή ενοχλεί τα μάτια, το δέρμα αλλά και το αναπνευστικό σύστημα.

4.3.2 Οξείδια του αζώτου

Τα οξείδια του αζώτου είναι παραπροϊόν διεργασιών καύσης υψηλής θερμοκρασίας. Ο σχηματισμός αυτών των ενώσεων εξαρτάται κυρίως από τη θερμοκρασία της φλόγας και τη συγκέντρωση οξυγόνου: θερμοκρασία πάνω από 1300 °C και συγκέντρωση οξυγόνου μεγαλύτερη από 2% προωθεί το σχηματισμό των NO_x. Ο κύριος παράγοντας που σχηματίζεται από την καύση είναι το NO, ενώ μικρή ποσότητα του NO₂ (συνήθως μικρότερη από 5%) σχηματίζεται. Και οι δύο αυτές ενώσεις έχουν φωτοχημικό αντίκτυπο στην ατμόσφαιρα.

Τα αποτελέσματα των οξειδίων αζώτου στον άνθρωπο είναι παρόμοια με αυτά του SO₂.

4.4 Στερεά απόβλητα

Τα στερεά απόβλητα της χαρτοποιίας διακρίνονται σε απορρίμματα, τα οποία απομακρύνονται από την παραγωγική διαδικασία και εξισώνονται με τα αστικά απορρίμματα και παραπροϊόντα της παραγωγικής διαδικασίας και της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων που αποτελούν βιομηχανικά απορρίμματα. Από τη διάθεση των στερεών και ένυδρων στερεών τους αποβλήτων (λάσπες), οι χαρτοβιομηχανίες προκαλούν ρύπανση του εδάφους και των υπόγειων υδροφορέων.

Τα στερεά απόβλητα κυρίως παράγονται από την πολτοποίηση, τις λειτουργίες ανακύκλωσης και την επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Η ποσότητα και η σύνθεση τους εξαρτάται από την ποσότητα παραγόμενου χαρτιού, τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται, τις διεργασίες που εφαρμόζονται και τις ιδιότητες χαρτιού που πρέπει να επιτευχθούν. Τα εξομοιούμενα με οικιακά απορρίμματα αποτελούνται συνήθως από υλικά, τα οποία συνοδεύουν τις πρώτες ύλες, όπως σύρματα, σχοινιά, χώμα, άμμος, πέτρες, φελιζόλ, πλαστικά, τεμάχια ξύλου κλπ. Το μεγαλύτερο ποσοστό των υλικών αυτών απομακρύνεται από τις σχάρες των πολτοποιητών και στη συνέχεια από τους υδροκυκλώνες και τα δονούμενα κόσκινα. Τα υλικά αυτά συγκεντρώνονται συνήθως σε υπαίθριους χώρους, συσκευάζονται και διαθέτονται, από κοινού με τα συνήθη οικιακά απορρίμματα ή μετά από διαλογή, στο εμπόριο. Τα εξομοιούμενα με βιομηχανικά απορρίμματα παράγονται στις διαδικασίες απομάκρυνσης των ξένων προσμείξεων από τις πρώτες ύλες, στις διεργασίες επεξεργασίας του νερού χρήσης και στις εγκαταστάσεις βιολογικού καθαρισμού των αποβλήτων. Από το είδος των υλικών και των διεργασιών που χρησιμοποιεί η χαρτοβιομηχανία, εκτιμάται ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των οργανικών καταλοίπων που καταλήγει στα ένυδρα ιζήματα συνίσταται σε διαφυγές ινών, ενώ τα ανόργανα συνίστανται κυρίως από καολίνη.

Οι κύριοι τύποι των στερεών αποβλήτων που παράγονται από τους μύλους πολτού και χάρτου είναι οι εξής:

- Από του μύλους πολτού:
 - Απορρίμματα που αποτελούνται από άμμο, υπολείμματα φλοιού και ξύλου και έχουν σχετικά χαμηλή υγρασία, υψηλή θερμοκρασία, εύκολα αφυδατώνονται και γενικά καίγονται σε λέβητες για ανάκτηση ενέργειας.

- Ιλύς πράσινου διαλύματος και ιλύς ασβέστου, που είναι οι ανόργανες ιλεις που διαχωρίζονται από τον κύκλο χημικής ανάκτησης.
- Ιλύς από επεξεργασία υγρών αποβλήτων, που προέρχεται από δύο πηγές, δηλαδή την πρωτοβάθμια ιλύ και τη βιολογική ιλύ που παράγεται από τον δεύτερο διαυγαστήρα.
- Ιλύς χημικής κροκίδωσης που προέρχεται από επεξεργασία υδάτων.
- Από τους μύλους χαρτιού:
 - Απορρίμματα που αποτελούνται από ακαθαρσίες, όπως κόμπους ινών και άλλα χημικά που λειτουργούν ως ενισχυτικά.
 - Ιλύς από ανακύκλωση που αποτελείται κυρίως από ίνες, επιχρίσεις, πληρωτικά υλικά, μελάνη και χημικές ουσίες.
 - Πρωτοβάθμια ιλύς που παράγεται από την διαύγαση του νερού διεργασίας, πχ μέσω επίπλευσης.
 - Δευτεροβάθμια ή βιολογική ιλύς που παράγεται από το διαυγαστήρα των βιολογικών μονάδων της επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, και είτε ανακυκλώνεται ή συμπυκνώνεται, αφυδατώνεται και έπειτα αποτεφρώνεται ή απορρίπτεται σε χωματερή.

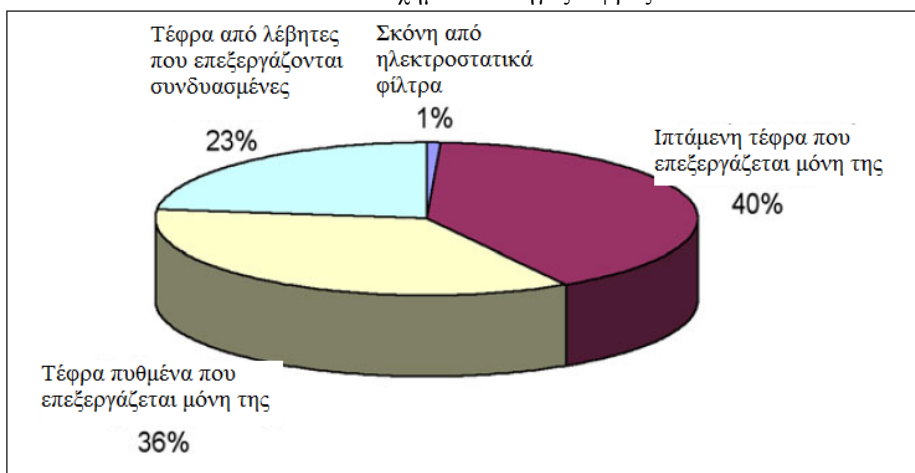
Οι όγκοι της δευτεροβάθμιας ιλύος είναι μικρότεροι από αυτούς που προκύπτουν από την πρωτοβάθμια, αφού τα μεγαλύτερα, ινώδη ή ανόργανα στερεά αφαιρούνται στον πρωτοβάθμιο διαυγαστήρα.

Σε κάποιες περιπτώσεις, οι σταθμοί ανακύκλωσης χαρτιού παράγουν περισσότερα στερεά απόβλητα από τους σταθμούς παρθένων ινών. Αυτό το υπόλειμμα αποτελείται κυρίως από ανόργανες ίνες, επικαλύψεις και ίνες χαρτιού που ξεπλένονται από το ανακυκλωμένο χαρτί στη διαδικασία καθαρισμού ινών. Οι σταθμοί χαρτιού τύπωσης και γραφής τείνουν να παράγουν την περισσότερη ιλύ, ενώ αυτοί των χαρτονιών παράγουν λιγότερη.

4.4.1 Τέφρα

Ένας σημαντικός συντελεστής των στερεών αποβλήτων είναι η τέφρα. Εκτιμήθηκε ότι 553000 τόνοι τέφρας παρήχθησαν μόνο από τους σταθμούς του Καναδά το 1995. Μία πιο πρόσφατη έρευνα βρήκε ότι 772000 τόνοι τέφρας παρήχθησαν το 2002. Αυτό δείχνει ότι ο ρυθμός παραγωγής τέφρας ουσιαστικά αυξήθηκε. Επίσης, τα δεδομένα δείχνουν ότι 99% της τέφρας παράγεται από λέβητες ισχύος, με μόνο 1% σκόνη που προέρχεται από ηλεκτροστατικά φίλτρα από λέβητες ανάκτησης (Σχήμα 3.5). (Allan Elliot, Οκτώβριος 2006)

Σχήμα 3.5. Πηγές τέφρας



Πηγή: Allan Elliot, Οκτώβριος 2006

Η πλειοψηφία των απόβλητων ξύλων που παράγονται από σταθμούς πολτού και πριονιστήρια χρησιμοποιούνται ως καύσιμο σε λέβητες ισχύος για την παραγωγή ατμού, η ηλεκτρισμού ή και των

δύο. Η ιπτάμενη τέφρα από αυτούς τους λέβητες ισχύος ή ατμού συλλέγονται από ένα ηλεκτροστατικό φίλτρο, πλυντρίδες υγρού τύπου, ή μία μηχανική συσκευή όπως φίλτρο καθαρισμού. Η συλλεγμένη τέφρα έπειτα στέλνεται για απόρριψη ή σε ωφέλιμες εφαρμογές.

Το ανόργανο κλάσμα στην τέφρα ποικίλλει με το είδος ξύλου που καίγεται. Η περιεκτικότητα σε τέφρα βρέθηκε να ποικίλλει από 4 – 53%. Η τέφρα από υπολείμματα καμένων κορμών μπορεί να περιέχει συγκεντρώσεις μετάλλων, όπως πυρίτιο και νάτριο. Παράκτιοι μύλοι συχνά καίνε απόβλητα ξύλου που περιέχουν υψηλές συγκεντρώσεις αλατιού, που προκαλούν υψηλές συγκεντρώσεις χλωριούχου άλατος στην τέφρα σε σχέση με τους μύλους στην ενδοχώρα. Οι τέφρες από ξύλο διαφέρουν σημαντικά από αυτές από κάρβουνο. Αυτές που προέρχονται από καύση ξύλου έχουν πολύ μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε Na, K και Ca και χαμηλότερη σε Al. Οι υψηλότερες συγκεντρώσεις Na, K, Ca, Mg και P στην τέφρα ξύλου δηλώνουν την υπεροχή της ως πηγή αλκαλικότητας και θρεπτικών ουσιών. Όμως, όντας ελλειπείς σε άζωτο, οι τέφρες αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν με άλλα λιπάσματα εδάφους για την παροχή μιας πλήρους θρεπτικής στρατηγικής διαχείρισης. Ένα αρνητικό σημείο της τέφρας ξύλου σε σχέση με την τέφρα κάρβουνου, είναι ότι οι συγκεντρώσεις των Mn, Zn και Cd μπορεί να είναι υψηλότερες.

Υπάρχουν διαφορές στις στοιχειώδεις συνθέσεις ταφρών που προέρχονται από καύση ξύλου και καύση υπολειμμάτων πολτού και χάρτου (Πίνακας 3.2). Αυτό γίνεται κυρίως λόγω ανομοιομοριών στις ιδιότητες του ξύλου και της πολτοποιημένης ίνας. Αρκετές εκλεπτύνσεις της ίνας κατά τη διεργασία πολτού και χάρτου προκαλούν αλλαγές στη χημική της φύση, σε σύγκριση με το αρχικό ξύλο. Οι διαφορές αυξάνουν περαιτέρω με την πρόσθεση των πρωτοβάθμιων στερεών υπολειμμάτων και της ενεργούς ύλης, που διαφέρουν σημαντικά από το στερεό ξύλο. Οι τέφρες ξύλου μπορούν να περιέχουν μέχρι 50% άκαυστο άνθρακα.

Πίνακας 3.2. Σύγκριση ταφρών που προκύπτουν από την καύση ξύλου / φλοιού με αυτές από την καύση υπολειμμάτων πολτού και χάρτου

Στοιχείο	Τέφρα από ξύλο και φλοιό MG/KG		Τέφρα από υπολείμματα πολτού και χάρτου MG / KG	
	1991 Δείγμα	1992 Δείγμα	1993 Δείγμα	1995 Δείγμα
Οργανικός C	-	-	-	247,000
N	600	900	-	4,520
P	14,000	6,900	1,800	3,000
S	4,455	6,800	-	-
Ca	317,400	109,400	94,900	120,000
Mg	22,500	16,200	6,500	7,730
K	41,300	28,600	10,300	13,300
Na	3,400	1,600	6,700	1,410
Al	23,650	13,000	82,100	12,500
Fe	19,500	3,300	14,300	6,260
Mn	6,693	3,470	3,300	2,600
Ba	-	-	549	588
Zn	700	794	423	183
Cu	143	78	151	67
B	8	127	-	95
Mo	114	-	61	15
Pb	130	66	32	72
Ni	47	12	65	16
Cr	8	14	1,036	75
Co	-	4	-	14
Cd	21	3	<1	2

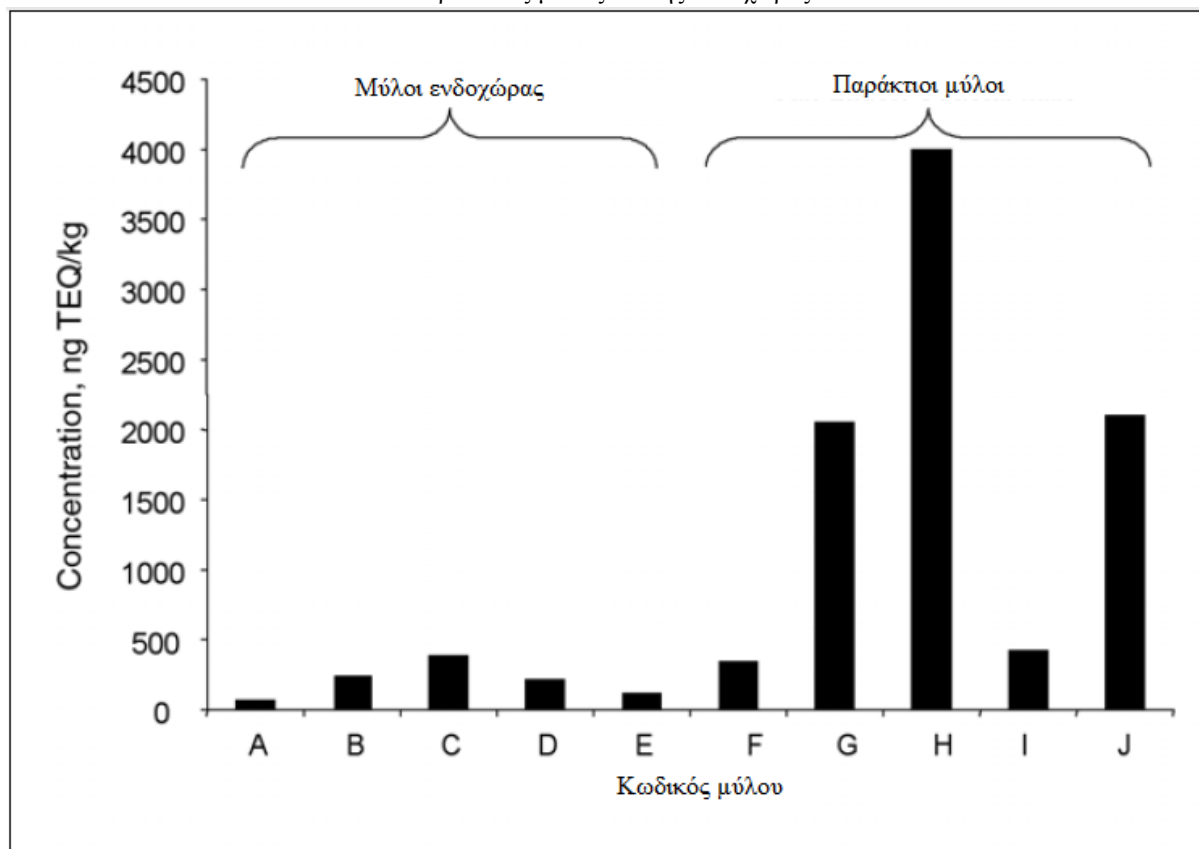
Πηγή: Allan Elliot, Οκτώβριος 2006

Η τέφρα που δεν βγαίνει από τον λέβητα με τα απαέρια συσσωρεύεται στον πυθμένα του. Υπάρχει γενικά ένα κόσκινο ή μία σχάρα μέσα σε αυτόν που επιτρέπει στην τέφρα να περάσει διαμέσου (σε περίπτωση δονούμενης σχάρας), να παρακρατηθεί και να συλλεχθεί (για σταθερή σχάρα) κτλ. Η τέφρα σχάρας γενικά συνδυάζεται με την ιπτάμενη για απόρριψη. Οι Luthe και Wunderli βρήκαν ότι οι συγκεντρώσεις διοξίνης και φουράνης στην ιπτάμενη τέφρα είναι υψηλότερες από την τέφρα πυθμένα.

Η θερμοκρασία παίζει ένα σημαντικό ρόλο στον καθορισμό της παραγόμενης ποσότητας τέφρας. Ο Etiegni βρήκε ότι αυξάνοντας τη θερμοκρασία, απομένει λιγότερη τέφρα. Για παράδειγμα, 45% λιγότερη τέφρα παράγεται όταν οι θερμοκρασίες αυξάνονται από 538 °C στους 1093 °C. Η περιεκτικότητα σε άνθρακα βρέθηκε να είναι το χαρακτηριστικό εκείνο που εξαρτάται περισσότερο από τις θερμοκρασίες καύσης. Η τέφρα πυθμένα συνήθως περιέχει λιγότερο άνθρακα από την ιπτάμενη λόγω της σχετικά εκτενούς έκθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες.

Ενδιαφέρον προκύπτει όταν προτείνονται ωφέλιμες χρήσεις για την τέφρα από παράκτιους μύλους όσον αφορά την παρουσία διοξινών και φουράνων που προέρχονται από την καύση υπολειμμάτων ξύλου φορτισμένων με αλάτι. Το Σχήμα 3.6 συγκρίνει τις συγκεντρώσεις διοξίνης και φουράνης στην τέφρα από παράκτιους μύλους και της ενδοχώρας. Ακόμα και ανάμεσα στις παράκτιες περιοχές, υπάρχουν διαφορές ως αποτέλεσμα της ανομοιομορφίας της περιεκτικότητας σε αλάτι, των συνθηκών λειτουργίας του λέβητα, των θερμοκρασιών κτλ.

Σχήμα 3.6. Σύγκριση συγκεντρώσεων διοξινών και φουράνων σε ιπτάμενη τέφρα από την καύση ξύλου σε παράκτιους μύλους και της ενδοχώρας



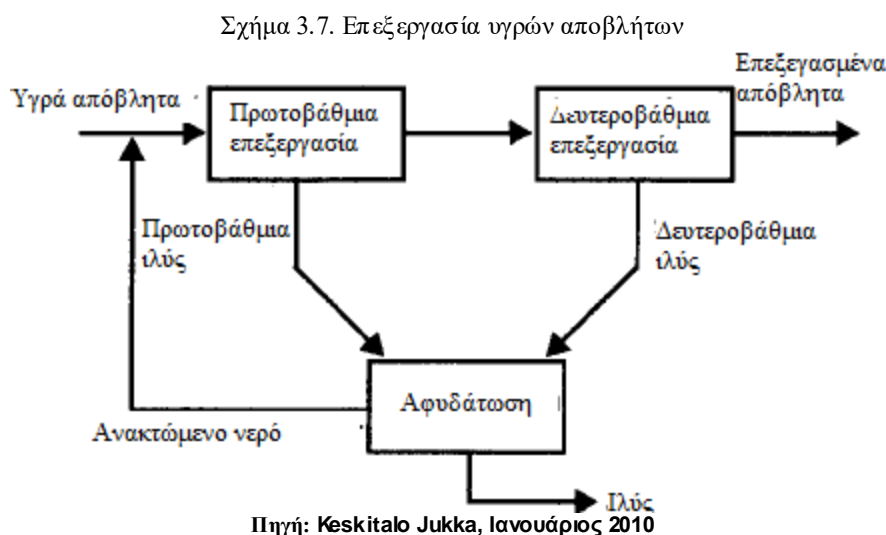
Πηγή: Allan Elliot, Οκτώβριος 2006

Οι συγκεντρώσεις διοξινών και φουρανών είναι πολύ υψηλές σε σύγκριση με την τέφρα πυθμένα.

Οι συγκεντρώσεις χλωριούχου άλατος λιγότερο από 0.01% γενικά έχει βρεθεί ότι παράγει στοιχειώδεις ποσότητες διοξινών και φουρανών, ενώ συγκεντρώσεις μεγαλύτερες ή ίσες με 0.05% θεωρούνται ευνοϊκές για τη διαμόρφωση τους. Πρόσφατη έρευνα πρότεινε ότι για το εύρος 0 – 2.5% άλατος, υπάρχει μία γραμμική αύξηση στην παραγωγή διοξινών και φουρανών. Όμως, η συνολική συγκέντρωση παραμένει πολύ χαμηλή στην τέφρα. Ακόμα και όταν οι συγκεντρώσεις χλωριούχου άλατος στο ξύλο είναι χαμηλές, μηδαμινές ποσότητες διοξινών και φουρανών μπορούν ακόμα να σχηματιστούν όταν οι φούρνοι λειτουργούν άσχημα, ή όταν η τέφρα εκτίθεται σε θερμοκρασίες 200 – 500 °C. Αυτό υποδεικνύει αύξηση στην περιεκτικότητα σε αλάτι δεν συνδέεται αναγκαία με υψηλότερες συγκεντρώσεις διοξινών και φουρανών στην τέφρα. Ο Watkinson πρότεινε ότι παράμετροι όπως συγκέντρωση CO σε απαέρια, περιεκτικότητα υγρασίας σε ξύλο, αποτελεσματικότητα καύσης, θερμοκρασία λειτουργίας λέβητα και περιεκτικότητα τέφρας σε άνθρακα μπορεί να επηρεάζουν τον σχηματισμό διοξίνης και φουράνης.

4.4.2 Ιλύς

“Ιλύς” είναι ένα όρος για τα υπολείμματα που προκύπτουν από τη διεργασία πολτού και την κατασκευή χαρτιού. Για την καλύτερη κατανόηση των ιδιοτήτων της, είναι απαραίτητο να αναφερθεί ο τρόπος δημιουργίας της. Γενικά, είναι το στερεό υπόλειμμα που ανακτάται από τη ροή υγρών αποβλήτων της πολτοποιήσης και της διεργασίας κατασκευής χαρτιού (Σχήμα 3.7). (Keskitalo Jukka, Ιανουάριος 2010)



Η ιλύς παράγεται σε δύο στάδια στη διεργασία επεξεργασίας των αποβλήτων. Οι δύο βασικές κατηγορίες ιλύων είναι αυτές της πρωτοβάθμιας και δευτεροβάθμιας επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Η πρωτοβάθμια ιλύς ανακτάται κατά το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας από το πρωτοβάθμιο διαυγαστήρα. Αυτό συμβαίνει κυρίως με καθίζηση, αλλά επίσης μπορεί να επιτευχθεί και με επίπλευση.

Η δευτεροβάθμια ιλύς προκύπτει από τη βιολογική επεξεργασία και απομακρύνεται με διάγνωση όπως και στην πρωτοβάθμια επεξεργασία. Η ιλύς αυτή έπειτα αναμειγνύεται με την πρωτοβάθμια πριν την αφυδάτωση και την περεταίρω επεξεργασία της. Οι δευτεροβάθμιες ιλεις εμφανίζουν μικρότερη συγκέντρωση σε ανόργανα στερεά απ' ότι οι πρωτοβάθμιες, παρόλα αυτά όμως, υφίστανται μια από κοινού επεξεργασία ως ενιαίο μίγμα, το οποίο καλείται νωπή (φρέσκια) ιλύς.

Η ιλύς των λυμάτων περιέχει συστατικά με γεωργική αξία αλλά και ρυπαντές. Τα συστατικά με γεωργική αξία είναι οργανική ύλη, άζωτο, φώσφορος, κάλιο και σε μικρότερη κλίμακα ασβέστιο, θείο και μαγνήσιο. Οι ρυπαντές είναι τα βαρέα μέταλλα, οι οργανικοί ρυπαντές και τα παθογόνα.

4.4.2.1 Τα στερεά της ιλύος

Τα στερεά που συνήθως βρίσκουμε στην ιλύ χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- α) τα αιωρούμενα στερεά (Suspended Solids - SS)
- β) τα διαλυμένα στερεά (Diluted Solids - DS)

Για τον προσδιορισμό των στερεών της ιλύος, συνήθως χρησιμοποιείται φιλτράρισμα, με το οποίο κατακρατούνται τα αιωρούμενα στερεά, και εξάτμιση για να απομακρυνθούν τα διαλυμένα στερεά. Επειδή όμως ο προσδιορισμός αυτός συχνά είναι δύσκολος και οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα αιωρούμενα στερεά (SS) είναι περίπου ίσα με τα ολικά στερεά (TS), για περισσότερη ακρίβεια συστήνεται η χρήση φυγοκέντρωσης για την μέτρηση της συγκέντρωσής τους.

Πολλές έρευνες δείχνουν ότι τα πιο σημαντικά στερεά στην ιλύ είναι ακριβώς αυτά που δεν είναι εύκολο να ανιχνευθούν και τα οποία συχνά δεν λαμβάνουμε υπ' όψη.

4.4.2.2 Επεξεργασία ιλύος

Η συμπύκνωση είναι μία διεργασία για την αύξηση της συγκέντρωσης στερεών στην ιλύ και τη μείωση του όγκου της αφαιρώντας μία ποσότητα νερού. Η συμπυκνωμένη ιλύς παραμένει σε ρευστή κατάσταση και είναι δυνατή η άντληση της χωρίς δυσκολία. Ο λόγος της μείωσης του όγκου με συμπύκνωση είναι η αύξηση της αποτελεσματικότητας και η μείωση του κόστους ακόλουθων σταδίων επεξεργασίας. Η συμπύκνωση της απόβλητης ενεργούς ιλύος είναι σημαντική εξαιτίας του υψηλού της όγκου και της χαμηλής συγκέντρωσης στερεών. Η συμπύκνωση από συγκέντρωση στερεών 1% σε 2%, μειώνει τον όγκο ιλύος κατά το μισό. Αν συγκεντρώνεται σε 5% στερεών, ο όγκος μειώνεται στο 1/5 του αρχικού της όγκου.

Η αφυδάτωση είναι η αφαίρεση νερού από την ιλύ για την επίτευξη μειώσεων όγκου μεγαλύτερων από την συμπύκνωση. Η αφυδάτωση της ιλύος προκαλεί ένα υλικό σε στερεά – ημιστερεά κατάσταση που είναι ευκολότερη στο χειρισμό.

4.5 Υγρά απόβλητα

Παραδοσιακά, οι βιομηχανίες πολτού και χαρτιού είναι μεγάλοι χρήστες νερού. Σήμερα, σημαντικές προσπάθειες γίνονται για τη μείωση χρήσης νερού, αφού κάθε επεξεργασία αποβλήτων είναι ευκολότερη αν ο όγκος τους μειώνεται. Επίσης, με έντονη επανακυκλοφορία και επαναχρησιμοποίηση των υγρών αποβλήτων στον σταθμό, οι ποσότητες των ρύπων μπορούν να μειωθούν. Οι εκκενώσεις στο νερό φέρουν τη μεγαλύτερη πιθανότητα να εισάγουν ρύπους απευθείας στο περιβάλλον και την τροφική αλυσίδα.

Η σύσταση των υγρών αποβλήτων των μονάδων παραγωγής χάρτου είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη καθώς αποτελείται από ένα μίγμα οργανικών ενώσεων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά τα διάφορα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας χρησιμοποιούνται πολλές χημικές ουσίες, ώστε να προσδώσουν στο τελικό προϊόν ορισμένα χαρακτηριστικά όπως αντοχή απορροφητικότητα, συγκεκριμένο χρώμα κτλ. Οι κύριες πηγές ρύπων από τους μύλους πολτού και χάρτου παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.3.

Πίνακας 3.3. Συνηθισμένα υγρά απόβλητα από διεργασίες πολτού και χάρτου

Πηγές	Χαρακτηριστικά λυμάτων
Νερό που χρησιμοποιείται στην προετοιμασία του ξύλου και την πλύση του	Στερεά, BOD, χρώμα
Βραστήρας ξύλου	BOD, μπορεί να περιέχει και ενώσεις θείου
"Λευκό νερό" από φιλτράρισμα πολτού, συμπύκνωση και καθαρισμό	Μεγάλος όγκος νερού με αιωρούμενα στερεά, μπορεί να έχει σημαντική ποσότητα BOD
Διήθημα από πλυντρίδες σταθμών λεύκανσης	BOD, χρώμα, χλωριωμένες οργανικές ενώσεις
Ροή νερού από χαρτομηχανή	Στερεά

Πηγή: Keskitalo Jukka, Ιανουάριος 2010

Τα υγρά απόβλητα της χαρτοβιομηχανίας παρουσιάζονται σαν πολυφασικό μείγμα, στο οποίο συνυπάρχουν στερεά, τέλεια διαλύματα και κολλοειδείς διασπορές. Η κύρια μάζα των λυμάτων είναι το νερό. Οι οργανικές ενώσεις που περιέχουν τα ανεπεξέργαστα απόβλητα της χαρτοβιομηχανίας εξαρτώνται από το είδος των πρώτων και βοηθητικών υλών, τις παραγωγικές διεργασίες που εφαρμόζει κάθε εργοστάσιο και το είδος του παραγόμενου προϊόντος. Η επίδραση του νερού και ηλεκτρολυτών στη χαρτομάζα ή το χρησιμοποιημένο χαρτί προκαλεί τη διαλυτοποίηση των οργανικών και ανόργανων συστατικών. Η ύπαρξη οργανικού υποστρώματος στα απόβλητα, μικροοργανισμών και CO₂ που προέρχεται από την ατμόσφαιρα, προκαλούν βιολογικές διεργασίες, οι οποίες συντελούν ώστε οι αρχικές οργανικές ενώσεις να συνυπάρχουν με τα προϊόντα της αποσύνθεσής τους, δηλαδή αμινοξέα, αμμωνία, υδρόθειο, αλκοόλες, λιπαρά οξέα, φαινόλες, ινδόλη, CO₂, μεθάνιο, υδρογόνο, νιτρικά και νιτρώδη άλατα, θείο και θειικά άλατα καθώς και με διάφορες άλλες οργανικές και ανόργανες ενώσεις. Σε κάθε περίπτωση, το είδος των πρώτων και βοηθητικών υλών (κυρίως κυτταρίνη) συντελεί στην έλλειψη στα απόβλητα των αναλογιών αζώτου και φωσφόρου προς τον άνθρακα που επιτρέπουν τη βιολογική αποσύνθεση. Ανασταλτικό παράγοντα για την επεξεργασία των αποβλήτων της χαρτοβιομηχανίας αποτελούν οι βιοκτόνες ενώσεις που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή και διαφεύγουν στα υγρά απόβλητα.

Οι κύριες κατηγορίες ρύπανσης υδάτων από τις μελέτες που έχουν διεξαχθεί είναι : αιωρούμενα στερεά σωματίδια (κυρίως ίνες), υψηλές τιμές βιολογικός απαιτούμενου οξυγόνου (Biologically Oxygen Demand- BOD) ή COD (Chemically Oxygen Demand, βιοχημικός απαιτούμενο οξυγόνο), νιτρικά και νιτρώδη ιόντα, φώσφορος, χλώριο, ολικές φαινόλες, λιγνίνη, τανίνες, τοξικότητα και χρώμα (Πίνακας 3.4).

Πίνακας 3.4. Τυπικά φορτία λυμάτων από διαφορετικούς μύλους πριν την εξωτερική επεξεργασία

	Όγκος εισερχόμενων λυμάτων [m ³ /t]	COD [kg/t]	BOD [kg/t]	Αιωρούμενα σωματίδια [kg/t]	Αζωτο [g/t]	Φώσφορος [g/t]
Θεικός πολτός, μη λευκασμένος	20-60	20-30	5-10	12-15	200-400	80
Θεικός πολτός, συμβατικά λευκασμένος	60-100	60-120	18-25	12-18	300-500	120
Θειώδης πολτός, συμβατικά λευκασμένος	150-200	60-100	30-40	20-40	100-200	60
Θεμομηχανικός πολτός, μη λευκασμένος	6-15	40-80	15-25	10-30	100-200	70
Πολτός, λευκασμένος με υπεροξειδίο	6-15	60-100	20-40	10-30	200-300	100
Χαρτί ποιότητας, επιγυρισμένο	30-50	10-20	3-8	10-20	50-100	5
Χαρτί εφημερίδας	10-25	2-4	1-3	5-10	10-20	5
Πορώδες χαρτί	20-40	3-6	1-3	5-10	50-80	8

Πηγή: Keskitalo Jukka, Ιανουάριος 2010

Τα αιωρούμενα στερεά σωματίδια μπορούν να μειωθούν εσωτερικά του σταθμού με επανακυκλοφορία υδάτων που περιέχουν ίνες. Εξωτερικά του σταθμού, τα σωματίδια αυτά μπορούν να αφαιρεθούν από τα απόβλητα με ένα συμβατικό σύστημα δεξαμενής βαρυτικής καθίζησης. Επιτυγχάνεται αποτελεσματικότητα απομάκρυνσης τους της τάξης 80 – 90%. Η ανακτώμενη ιλύς μεταφέρεται σε χωματερή ή αφυδατώνεται περαιτέρω και αποτεφρώνεται.

Η ζήτηση σε οξυγόνο (που μετριέται ως BOD) στα απόβλητα μπορεί να μειωθεί με μέτρα μέσα στο σταθμό, όπως καλή πλύση, ανάκτηση του μαύρου διαλύματος, επεξεργασία συμπυκνωμάτων που περιέχουν μεθανόλη, και κυρίως με την απολιγνίνωση με οξυγόνο. Όμως, η βιολογική επεξεργασία των αποβλήτων συνήθως απαιτεί τη μείωση του BOD αρκετά. Αυτό μπορεί να γίνει σε μεγάλες δεξαμενές σταθεροποίησης τροφοδοτούμενες με οξυγόνο ή σε αεριζόμενες δεξαμενές στις οποίες οι ρυθμοί μεταφοράς οξυγόνου αυξάνονται με τη χρήση μηχανικών εξαρτημάτων. Θρεπτικά συστατικά συχνά προστίθενται για τη βελτίωση της βακτηριακής δραστηριότητας.

Αυτά τα απόβλητα είναι ελαφρώς τοξικά, ειδικά αν έχουν περάσει από βιολογική επεξεργασία. Όμως, τα απόβλητα από την διεργασία λεύκανσης περιέχουν ποικιλία ουσιών που κάποιες θεωρούνται τοξικές, γονοτοξικές ή μεταλλαξιογόνες. Χλωριωμένες οργανικές ουσίες που παράγονται στη λεύκανση με χλώριο είναι αρκετά σημαντικές. Γι' αυτό υπάρχει η τάση αλλαγής από χλώριο στο πιο πειθήνιο διοξείδιο του χλωρίου ως μέσο λεύκανσης. Αν χρησιμοποιείται η απολιγνίνωση με οξυγόνο, μειώνεται ουσιαστικά η ποσότητα χλωριωμένων ενώσεων στα απόβλητα.

Μέχρι πρόσφατα, το χρώμα των απόβλητων των μονάδων παραγωγής χάρτου δεν θεωρείτο ότι αποτελούσε μεγάλο περιβαλλοντικό πρόβλημα. Το χρώμα οφείλεται κυρίως στη λιγνίνη, τα παράγωγά της (χλωρολιγνίνη) και στις πολυμερισμένες τανίνες. Έτσι, η απολιγνίνωση με οξυγόνο βοηθά ουσιαστικά. Σήμερα, πλέον έχει αναγνωρισθεί ότι η απόρριψη χρωματισμένων αποβλήτων στους υδάτινους αποδέκτες δεν αποτελεί μόνο αισθητικό πρόβλημα αλλά έχει περαιτέρω συνέπειες στα υδρόβια φυτά, αφού η ανάπτυξή τους παρεμποδίζεται από τη μειωμένη διαπερατότητα της ηλιακής ακτινοβολίας.

Άλλος ένας επιβαρυντικός παράγοντας για το περιβάλλον είναι το γεγονός ότι τα υγρά απόβλητα των συγκεκριμένων μονάδων που καταλήγουν στα υδάτινα οικοσυστήματα έχουν υψηλές θερμοκρασίες. Αυτό οφείλεται στα διάφορα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας και έχει ως

αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του νερού στο σημείο απόρριψης, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά τις βιοκοινωνίες.

Επίσης, τα ποσοστά φωσφόρου και αζώτου που περιέχουν μπορεί να προκαλέσουν ευτροφισμό των υδάτινων αποδεκτών. Πιστεύεται επίσης ότι η παρουσία του αζώτου επιτείνει την ελάττωση του φωσφόρου στο νερό. Ο φώσφορος είναι υπεύθυνος για την ανάπτυξη φυκιών που είναι σημαντικοί καταναλωτές αζώτου. Όταν ο φώσφορος απομακρύνεται, τα φύκια δεν αναπτύσσονται και τα κατάλοιπα αζώτου παραμένουν στο νερό δημιουργώντας ευτροφισμό. Το άζωτο υπάρχει στα απόβλητα των μονάδων παραγωγής χάρτου με τη μορφή ιόντων NO_x (NO_3 , NO_2), ενώ ο φώσφορος απαντάται κυρίως με την ανόργανη μορφή του PO_4 .

Τα απόβλητα των μονάδων παραγωγής χάρτου έχουν κυμαινόμενη τιμή pH, το οποίο στις περισσότερες των περιπτώσεων καλύπτει το εύρος 6 – 9.

Έτσι, οι μετρήσεις εκπομπών στο νερό περιλαμβάνουν τα εξής:

- Ενώσεις AOX, που μετρούν την ποσότητα των χλωριωμένων οργανικών ενώσεων στα απόβλητα και είναι ένας δείκτης ποσότητας χλωρίου στη λεύκανση και λιγνίνης στο μη λευκασμένο πολτό.
- BOD το οποίο μετρά το ποσό οξυγόνου που οι μικροοργανισμοί καταναλώνουν για να αποσυνθέσουν την οργανική ύλη. Εκκενώνοντας απόβλητα με υψηλά επίπεδα BOD, προκύπτει η μείωση του διαλυμένου οξυγόνου στο νερό, που μπορεί να επηρεάσει τα ψάρια και άλλους μικροοργανισμούς.
- Απόβλητα λεύκανσης που μετρούν την ποσότητα του διηθήματος του σταθμού λεύκανσης που δεν μπορεί να επανακυκλοφορήσει στο σύστημα ανάκτησης χημικών ουσιών.
- COD το οποίο μετρά το ποσό της οξειδωμένης οργανικής ύλης στα απόβλητα.
- Χρώμα που μετρά την ποσότητα φωτός που μπορεί να διεισδύσει στα απόβλητα. Επίσης, παρέχει πληροφορίες για την ποσότητα αποδομημένων προϊόντων λιγνίνης, επειδή αυτές οι ουσίες τείνουν να χρωματίζονται.
- Διοξίνες είναι μία ομάδα επίμονων, τοξικών ουσιών, περιλαμβάνοντας και τις φουράνες, που παράγονται σε ποσότητες ιχνών όταν ο μη λευκασμένος πολτός εκτίθεται στο χλώριο.
- Συνολικά αιωρούμενα σωματίδια που μετρούν την ποσότητα φλοιού, ινών, λάσπης, κόκκων και άλλων σκουπιδιών.

Τα απόβλητα από σταθμούς μηχανικής πολτοποίησης γενικά περιέχουν λιγότερες οργανικές ενώσεις από το χημικό πολτό, γιατί οι περισσότερες παραμένουν σε αυτόν και ουσιαστικά είναι ένα μίγμα αποδομημένης λιγνίνης και ουσιών του ξύλου. Τα συστήματα διεργασίας ανακτώμενου χαρτιού περιέχουν σημαντικές ποσότητες οργανικών αποβλήτων. Αυτή η ύλη αποτελείται κυρίως από άμυλο και άλλες ενώσεις. Τα απόβλητα του σταθμού λεύκανσης μπορεί επίσης να περιέχουν χλωριωμένες οργανικές ενώσεις, ανάλογα με την ποσότητα χλωρίου που χρησιμοποιείται.

4.5.1 Χρώμα

Για να παρουσιάσει χρώμα μία ένωση, πρέπει να απορροφήσει ορατό φως. Αυτή η προσρόφηση φωτός περιλαμβάνει τη μεταπήδηση ενός ηλεκτρονίου σε στάθμη υψηλότερης ενέργειας. Η ακτινοβολία στο ορατό φάσμα κατέχει αρκετή ενέργεια για να μεταβούν ηλεκτρόνια, σε επίπεδα υψηλότερης ενέργειας. Οι οργανικές ενώσεις που απορροφούν ορατό φως φαίνεται να φέρουν χρώμα.

Η λιγνίνη και τα προϊόντα αποσύνθεσής της θεωρούνται να είναι οι κύριες πηγές χρώματος αφού κατέχουν ένα μεγάλο αριθμό αρωματικών δακτυλίων. Η λιγνίνη απορροφά ακτινοβολία σε μικρά μήκη κύματος, γεγονός που είναι υπεύθυνο για την καφετί απόχρωση του πολτού.

4.5.1.1 Πηγές χρώματος

Το χρώμα στα υγρά απόβλητα των μύλων πολτού προέρχεται σχεδόν αποκλειστικά από τρεις πηγές: το βρασμό του πολτού, τη λεύκανση, και την παραγωγή χρωματιστού χαρτιού. Οι πηγές χρώματος που φέρουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον είναι ο βρασμός και η λεύκανση του πολτού. Το χρώμα από τις λειτουργίες βρασμού τυπικά εκκενώνεται στο στάδιο του τελικού πλυσίματος πριν το σταθμό λεύκανσης. Το χρώμα από αυτήν την πηγή είναι από μεγάλα μόρια λιγνίνης που είναι ελαφρώς διαλυτά σε υγρά διαλύματα σε ουδέτερα ή χαμηλά pH. Οι μοντέρνοι μύλοι πολτού ανακυκλώνουν αυτήν την ροή πίσω στη διαδικασία ανάκτησης. Σε αυτούς τους μύλους, το χρώμα από τη χημική πολτοποίηση αναπαριστά μόνο ένα μέρος του τελικού χρώματος στα απόβλητα.

5 Τεχνικές πρόληψης ρύπανσης

5.1 Εισαγωγή

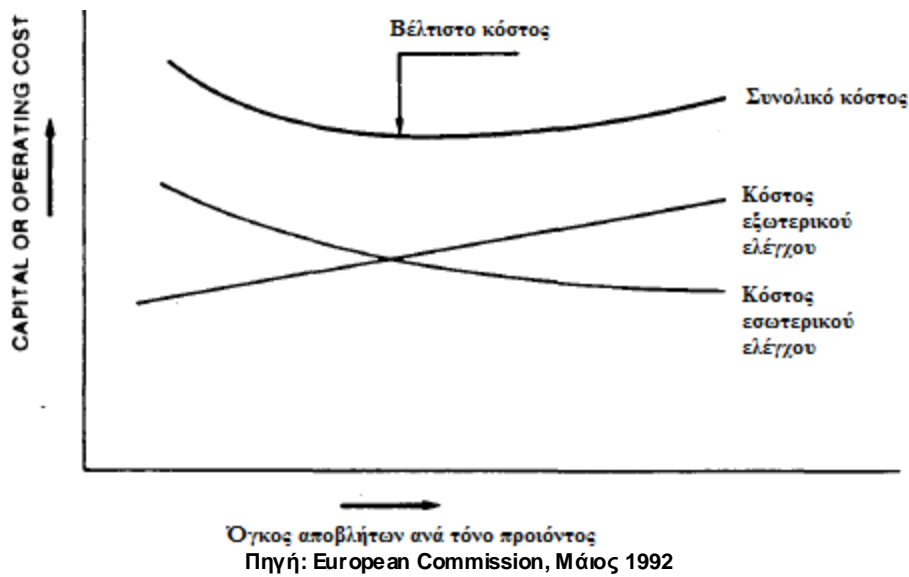
Ο καλύτερος τρόπος για τη μείωση της ρύπανσης είναι η πρόληψη ως πρώτο μέτρο. Οι βιομηχανίες έχουν δημιουργικά εφαρμόσει τεχνικές πρόληψης ρύπανσης που βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα και αυξάνουν τα κέρδη ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιούν τους περιβαλλοντικούς αντίκτυπους. Αυτό μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους, για παράδειγμα, μειώνοντας τις εσόδου υλικών, μεταβάλλοντας τις διεργασίες για την επαναχρησιμοποίηση παραπροϊόντων, βελτιώνοντας της πρακτικές διοίκησης και αντικαθιστώντας τα τοξικά χημικά. Κάποιες μικρότερες εγκαταστάσεις μπορούν να καλύψουν όλους τους κανονισμούς μόνο μειώνοντας τις εκπομπές ρύπων μέσω επιθετικών πολιτικών πρόληψης ρύπανσης.

Τα συστήματα χημικής ανάκτησης που χρησιμοποιούνται στις διεργασίες χημικής πολτοποίησης είναι ένα παράδειγμα τεχνολογιών πρόληψης ρύπανσης που εξελίχθηκαν μαζί με τις τεχνολογίες διεργασιών. Ένα αποτελεσματικό σύστημα χημικής ανάκτησης είναι ένα σημαντικό συστατικό της λειτουργίας ενός μύλου χημικής πολτοποίησης. Η ανάκτηση αναγεννά τα χημικά διεργασίας, μειώνοντας τη χρήση φυσικών πηγών και συνδεδεμένου κόστους, όπως επίσης και τις εκκενώσεις στο περιβάλλον, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ενέργειας. Πολλές πρόσφατες προσπάθειες πρόληψης ρύπανσης έχουν εστιάσει στη μείωση των εκπομπών τοξικών, και συγκεκριμένα χλωριωμένων ενώσεων. Οι τεχνικές πρόληψης ρύπανσης έχουν αποδειχθεί πιο αποτελεσματικές στον έλεγχο αυτών των ρύπων από τις συμβατικές τεχνολογίες ελέγχου και επεξεργασίας. Οι περισσότερες συμβατικές τεχνολογίες επεξεργασίας δεν είναι αποτελεσματικές στην καταστροφή πολλών χλωριωμένων ενώσεων. Προσπάθειες για την πρόληψη των χλωριωμένων εκπομπών, επομένως έχουν εστιάσει στη μείωση πηγών και στις τεχνικές αντικατάστασης υλικών. Τέτοιες προσπάθειες συνήθως απαιτούν ουσιαστικές αλλαγές στη διεργασία παραγωγής. Επιπροσθέτως στις αλλαγές διεργασίας, η βιομηχανία εφαρμόζει έναν αριθμό τεχνικών για τη μείωση χρήσης νερού και εκπομπών ρύπων. Η βιομηχανία επίσης προσπαθεί να αυξήσει την ποσότητα δευτερογενών και ανακυκλωμένων ινών που χρησιμοποιούνται στην πολτοποίηση.

Επειδή η βιομηχανία πολτού και χάρτου χρησιμοποιεί μεγάλα κεφάλαια και τεχνολογίες με εξοπλισμούς μεγάλης διάρκειας ζωής, οι σημαντικές ευκαιρίες πρόληψης ρύπανσης μέσω αλλαγών διεργασιών είναι ακριβές και απαιτούν μεγάλες χρονικές περιόδους εφαρμογής. Η βιομηχανία πολτού και χάρτου είναι αρκετά δυναμική, όμως, και κάνει συνεχώς αλλαγές διεργασιών και αντικαταστάσεις υλικών για την αύξηση παραγωγικότητας και μείωση κόστους. Η τάση προς την αντικατάσταση υλικών αντανακλάται σε μία αυξανόμενη ζήτηση για εναλλακτικά χημικά πολτοποίησης και λεύκανσης.

Σήμερα, η χαρτοβιομηχανία φέρει την αναγκαιότητα να αναπτύξει ένα συνδυασμό εσωτερικών και εξωτερικών τεχνολογιών αντιμετώπισης των αποβλήτων. (European Commission, Μάιος 1992) Μόνο η προσεκτική εξέταση των εναλλακτικών επιλογών στον εσωτερικό και εξωτερικό έλεγχο εκπομπών σε συνδυασμό με την παραγωγή αποβλήτων και την διατήρηση ενέργειας θα επιτρέψει βέλτιστες λύσεις του κόστους λειτουργίας. Το Σχήμα 4.1 δείχνει τη βελτιστοποίηση του κόστους κεφαλαίου και λειτουργίας.

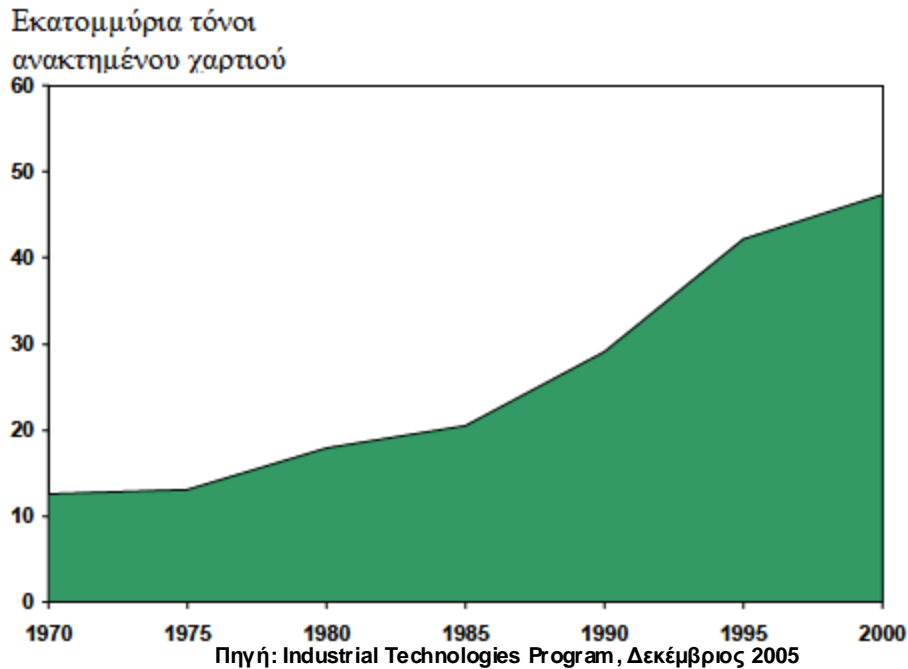
Σχήμα 4.1. Βελτιστοποίηση κόστους τεχνολογιών επεξεργασίας



5.2 Ανακύκλωση και ανάκτηση πρώτων υλών

Η μοντέρνα προσέγγιση ελαχιστοποίησης αποβλήτων γίνεται με δύο μέσα. Ο πρώτος τρόπος είναι η χημική ανάκτηση και ανακύκλωση. Στο Σχήμα 4.2 εμφανίζεται η αυξανόμενη τάση χρήσης ανακυκλωμένου χαρτιού.

Σχήμα 4.2. Χρήση ανακτώμενου χαρτιού στη χαρτοβιομηχανία



Αυτό το σύστημα ειδικά στη διεργασία χημικής πολτοποίησης μειώνει σημαντικά τους ρύπους και το επιπρόσθετο οικονομικό όφελος είναι άλλος ένας σημαντικός παράγοντας. Η χημική ανάκτηση είναι απαραίτητη εξαιτίας της οικονομικής βιωσιμότητας της διεργασίας Kraft.

Ο δεύτερος τρόπος για την ελαχιστοποίηση της παραγωγής αποβλήτων από τους μύλους πολτού και χάρτου είναι η εφαρμογή των Βέλτιστων Διαθέσιμων Τεχνικών (BATs). Υπάρχουν

διάφορες επιλογές και βέλτιστες τεχνικές (BATs) που χρησιμοποιούνται σε κάποιες χώρες για τη μείωση της ποσότητας των δευτερευόντων προϊόντων (απόβλητων).

Η ελαχιστοποίηση των αποβλήτων εξαρτάται από τον τύπο των μεθόδων παραγωγής και την διαθεσιμότητα καλών τεχνικών για την χρήση τους.

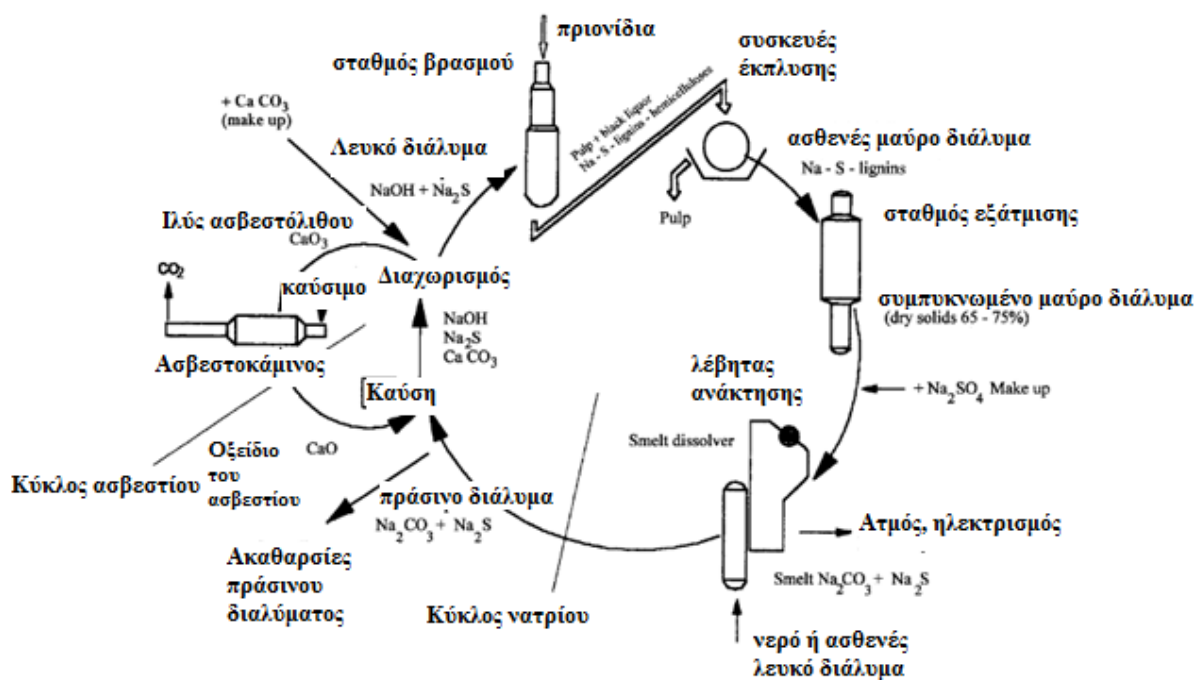
5.2.1 Σύστημα ανάκτησης χημικών ουσιών

Το σύστημα ανάκτησης χημικών ουσιών είναι ένα σύνθετο τμήμα ενός μύλου χημικού πολτού και χάρτου και υπόκειται σε μια ποικιλία περιβαλλοντικών κανονισμών. Η ανάκτηση χημικών ουσιών είναι ένα κρίσιμο στοιχείο της διεργασίας χημικής πολτοποίησης, αφού ανακτά τα χημικά της διεργασίας από τα υγρά υπολείμματα του βρασμού για επαναχρησιμοποίηση. Η διεργασία αυτή έχει σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη για τους μύλους πολτού και χάρτου. Τα οικονομικά οφέλη περιλαμβάνουν μείωση του κόστους αγοράς των χημικών ουσιών αφού ο λόγος αναγέννησης των χημικών πλησιάζει στο 98%. Τα περιβαλλοντικά οφέλη περιλαμβάνουν την ανακύκλωση των χημικών και την έλλειψη εκκενώσεων στο περιβάλλον.

Παρόλο που νεότερες τεχνολογίες αναπτύσσονται συνεχώς, η βασική διεργασία χημικών ουσιών από την πολτοποίηση Kraft δεν έχει αλλάξει ουσιαστικά από το 1884, που ήταν και ο χρόνος που παρουσιάστηκε.

Μία ποικιλία συμπληρωματικών διεργασιών χρησιμοποιούνται για την ανάκτηση χημικών ουσιών (Σχήμα 4.3). (European Commission, Δεκέμβριος 2001)

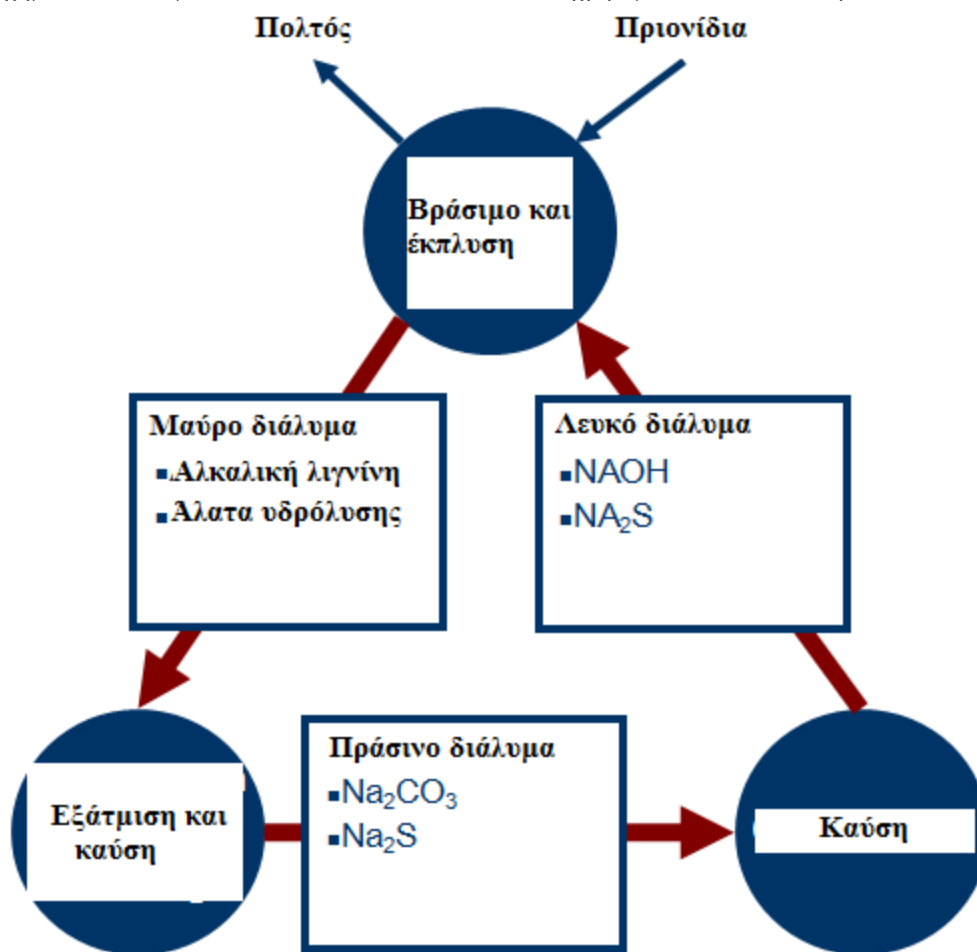
Σχήμα 4.3. Αναπαράσταση των χημικών διεργασιών που εκτελούνται κατά την χημική πολτοποίηση



Πηγή: European Commission, Δεκέμβριος 2001

Οι διαλυμένες οργανικές ενώσεις (μαύρο διάλυμα) πρέπει να αφαιρεθούν για περιβαλλοντικούς λόγους, και η καύση τους επίσης παράγει την περισσότερη ενέργεια θερμότητας που απαιτείται από τον σταθμό Kraft. Το διαλυμένο υδροξείδιο του νατρίου και το θειούχο νάτριο αναπαράγονται έτσι ώστε να επαναχρησιμοποιηθούν στο λευκό διάλυμα, και έτσι η διαρροή ενός περιβαλλοντικού ρύπου αποφεύγεται (Σχήμα 4.4). (Gaudreault Caroline, 2003)

Σχήμα 4.4. Διαλύματα που ανακυκλώνονται και επαναχρησιμοποιούνται από τη Kraft πολτοποίηση



Πηγή: Gaudreault Caroline, 2003

5.2.1.1 Εξάτμιση

Το μαύρο διάλυμα από την πλύση πολτού περιέχει 15 – 17% στερεές ενώσεις και πρέπει να συμπυκνωθεί στα 60 – 70% πριν καεί στον κλίβανο ανάκτησης. Στον Πίνακα 4.1 εμφανίζεται μία τυπική σύνθεση του μαύρου διαλύματος.

Πίνακας 4.1. Τυπική σύνθεση μαύρου διαλύματος

	% σε ξηρά στερεά
C	38.2
H	3.4
O	31.1
N	0.1
S	5.2
Na	19.8
K	1.9
Cl	0.1
Άλλα (Ca, Si, Fe, Mg, Al, Mn)	0.2

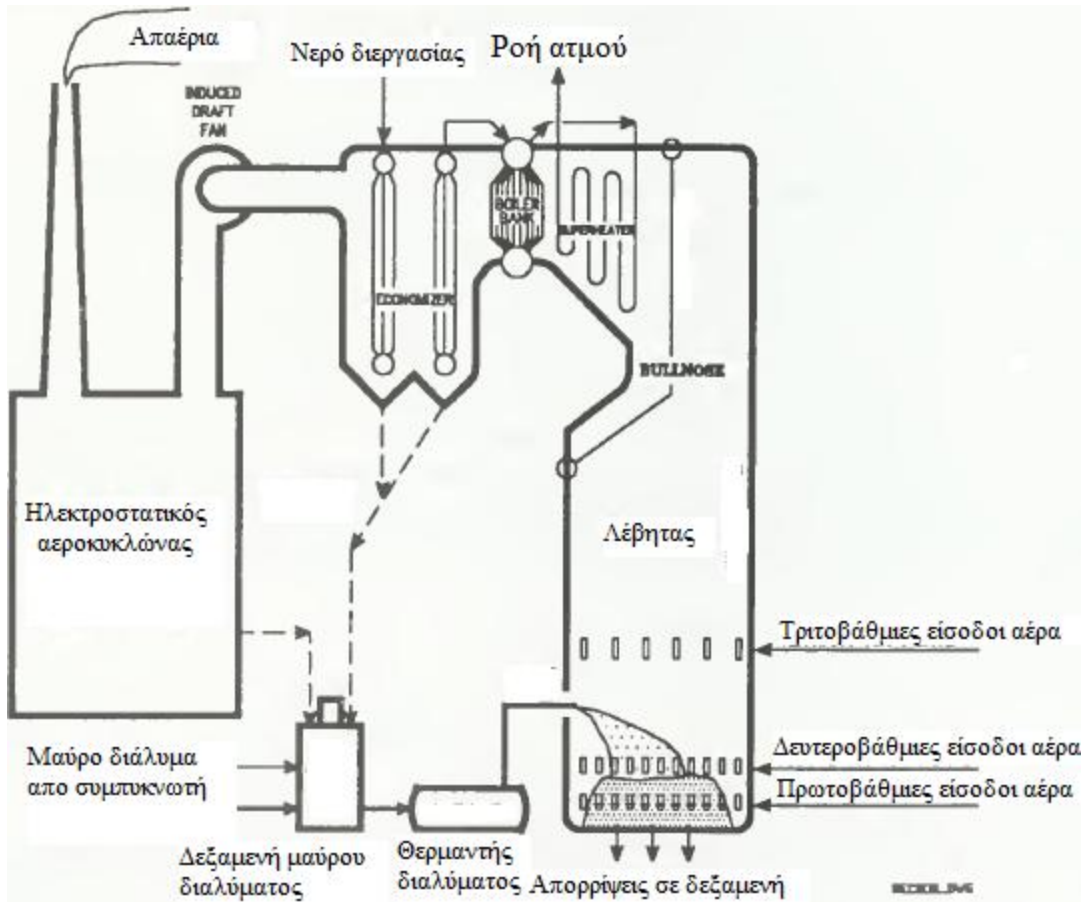
Πηγή: Gaudreault Caroline, 2003

Η εξάτμιση του μαύρου διαλύματος καταναλώνει ένα σημαντικό μέρος της θερμικής ενέργειας που απαιτείται στην διεργασία Kraft.

5.2.1.2 Καύση του μαύρου διαλύματος στο λέβητα ανάκτησης

Ο λέβητας καίει το οργανικό υλικό στο συγκεντρωμένο μαύρο διάλυμα, μειώνοντας τις οξειδωμένες ενώσεις θείου σε θειούχες. Η καύση παράγει ατμό υψηλής πίεσης στο λέβητα, που συχνά περνά μέσα από τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρισμό. Ο ατμός χαμηλής πίεσης που εξάγεται από την τουρμπίνα, χρησιμοποιείται ως θερμότητα διεργασιών στους σταθμούς του πολτού και του χαρτιού (Σχήμα 4.5).

Σχήμα 4.5. Τυπικό σύστημα μοντέρνου λέβητα ανάκτησης

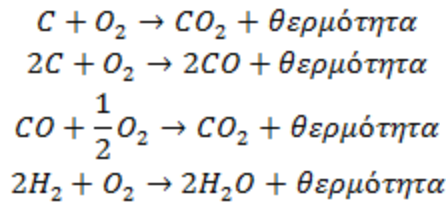


Πηγή: Gaudreault Caroline, 2003

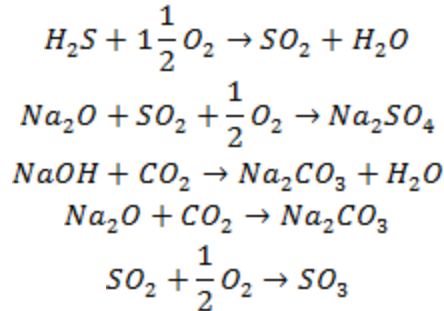
Ένας λέβητας ανάκτησης είναι ένας πολύπλοκος και πολύ ακριβός αντιδραστήρας, και οι χημικές αντιδράσεις που συμβαίνουν σε αυτόν είναι πολλές και σύνθετες. Η ανόργανη ύλη ανακτάται ως τηγμένο άλας, που μετά διαλύεται σε αραιό αλκάλιο. Το διάλυμα που προκύπτει λέγεται πράσινο διάλυμα και αποτελείται κυρίως από ανθρακικό και θειούχο νάτριο.

Ως αντιστάθμιση για τις χημικές ενώσεις που χάνονται στον κύκλο του σταθμού του πολτού, χημικές ενώσεις νατρίου και θείου προστίθενται στο μαύρο διάλυμα πριν την καύση. Παραδοσιακά, το θειούχο νάτριο χρησιμοποιείται ως χημικό αποκατάστασης εφοδιάζοντας και το νάτριο και το θείο. Όμως, οι καινούριοι σταθμοί χάνουν μικρές ποσότητες θείου, και έχει γίνει απαραίτητο να χρησιμοποιούνται χημικά αποκατάστασης χωρίς θείο στη μορφή υδροξειδίου του νατρίου NaOH ή ανθρακικής σόδας Na₂CO₃.

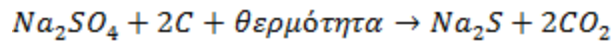
Οι ακόλουθες αντιδράσεις εξηγούν απλά την καύση των εύφλεκτων οργανικών ενώσεων:



Επίσης, συμβαίνουν και οι ακόλουθες αντιδράσεις:



Ο χημικός μετασχηματισμός που συμβαίνει στον λέβητα δεν προκαλεί μόνο καύση, αλλά επίσης περιλαμβάνει αναγωγή του θεικού νατρίου σε θειούχο νάτριο. Η κύρια αντίδραση είναι:



Η αντίδραση καταναλώνει ενέργεια, είναι ενδόθερμη. Αφού το θεικό νάτριο δεν συνεισφέρει στην αποστείρωση, είναι σημαντικό να διατηρείται μέγιστη αναγωγή του θεικού νατρίου σε θειούχο μέσα στο λέβητα. Ένα μέτρο της ποιότητας αυτής της αναγωγής ονομάζεται αποτελεσματικότητα αναγωγής και εκφράζεται ως

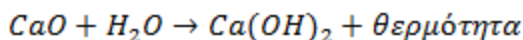
$$\text{αποτελεσματικότητα αναγωγής(\%)} = \frac{Na_2S \times 100}{Na_2S + Na_2SO_4}$$

5.2.1.3 Καύση

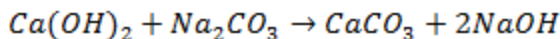
Εκτός από τις διαλυμένες χημικές ενώσεις που βασίζονται στο νάτριο (Na_2CO_3 , Na_2S και μικρότερες ποσότητες $NaOH$, Na_2SO_4 και $NaCl$), το πράσινο διάλυμα επίσης περιέχει μικρές ποσότητες αιωρούμενων στερεών σωματιδίων που αποτελούνται από άκαυστο άνθρακα και αδιάλυτα υδροξείδια μετάλλων και προκύπτει από την καύση του μαύρου διαλύματος. Για να αποφευχθούν προβλήματα στην καύση και στις διεργασίες ασβεστοποίησης, αυτά τα σωματίδια πρέπει να απομακρυνθούν. Αυτό γίνεται είτε χρησιμοποιώντας δεξαμενές καθίζησης εκμεταλλευόμενες τη βαρύτητα ή το πιο πρόσφατα αναπτυγμένο φίλτρο.

Ουσιαστικά, οι δεξαμενές βαρυτικής καθίζησης είναι μεγάλες κυκλικές δεξαμενές με τέτοιο μέγεθος που ο ρυθμός ανόδου του υγρού είναι πιο αργός από την τελική ταχύτητα των καθιζημάτων - σωματιδίων. Έτσι τα σωματίδια συλλέγονται στο, πάτο της δεξαμενής και μετά αποξύνονται με ένα αργά περιστρεφόμενο πτερύγιο προς ένα κεντρικό σημείο εξόδου. Έπειτα πλένονται για να απομακρυνθούν οι διαλυμένες χημικές ενώσεις και τέλος εκκενώνονται, συχνά σε χωματερές. Το αραιωμένο αλκαλικό διάλυμα που προκύπτει από την πλύση ανακυκλώνεται.

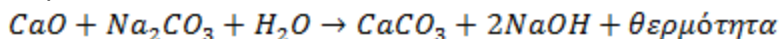
Το φιλτραρισμένο πράσινο διάλυμα και ο άνυδρος ασβέστης (οξείδιο του ασβεστίου) τροφοδοτούν συνεχώς με μετρούμενες ποσότητες το δοχείο αντίδρασης. Το οξείδιο ασβεστίου αντιδρά με το νερό εξώθερμα για να δημιουργήσει υδροξείδιο του ασβεστίου.



Ο πολτός περνάει μέσω αναδευόμενων δεξαμεμών που παρέχουν τον χρόνο διατήρησης για την αντίδραση καύσης:



Η συνολική αντίδραση είναι:



Με αυτές τις αντιδράσεις, μετατρέπεται το Na_2CO_3 σε NaOH με αποτέλεσμα να δημιουργείται πάλι το λευκό διάλυμα που περιέχει τις απαραίτητες χημικές ουσίες για την έναρξη της χημικής πολτοποίησης.

5.2.1.4 Μετατροπή του ασβεστόλιθου CaCO_3 σε οξείδιο του ασβεστίου CaO

Ο πολτός από τους καυστήρες τροφοδοτείται σε μία δεξαμενή βαρυτικής καθίζησης. Η υποχείλιση της παχύρρευστης ιλύος άσβεστου από την δεξαμενή περιέχει σχεδόν 40% αιωρούμενα στερεά σωματίδια. Αυτός ο πολτός πλένεται αραιώνοντας τον με νερό ή αλκάλιο και μετά επιτρέποντας στα σωματίδια να καθιζάνουν σε άλλη δεξαμενή που ονομάζεται “πλυντρίδα ιλύος”. Το αλκαλικό διάλυμα που προκύπτει χρησιμοποιείται για να φτιαχτεί νέο πράσινο διάλυμα. Η παχύρρευστη πλυμένη ιλύς αποθηκεύεται πριν μία τελική πλύση και ένα στάδιο αφυδάτωσης σε μία πλυντρίδα περιστροφικού τυμπάνου.

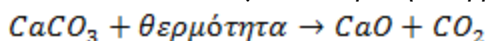
Όπως και στο φιλτράρισμα του πράσινου διαλύματος, σήμερα τα φίλτρα είναι πιο συνηθισμένα και στο φιλτράρισμα του λευκού διαλύματος και στην πλύση ιλύος.

Η ιλύς από CaCO_3 που έρχεται από την αποθήκευση, πλένεται και αφυδατώνεται σε φίλτρο, που αυξάνει την περιεκτικότητα σε στερεά σωματίδια 70 -80%. Ο καθαρισμός από ενώσεις νατρίου γίνεται γιατί:

- Το θειούχο νάτριο συνεισφέρει στην εκπομπή υδρόθειου από τον κλίβανο.
- Άλατα νατρίου λιώνουν και λειτουργούν ως κόλλα για τις ενώσεις ασβέστη, δημιουργώντας δακτυλίους μέσα στον κλίβανο.

Μετά την πλύση και αφυδάτωση, η ιλύς ξηραίνεται και καίγεται (αποτεφρώνεται).

Συχνά και οι δύο λειτουργίες γίνονται σε αργά περιστρεφόμενη ασβεστοκάμινω. Σε τέτοιο κλίβανο, η υγρή λάσπη τροφοδοτείται στη μία άκρη του κεκλιμένου κλιβάνου, και μεταφέρεται αργά προς την άλλη. Ένας λέβητας τροφοδοτεί ζεστά αέρια που ταξιδεύουν αντίθετα από την λάσπη. Αυτή στεγνώνει και αποτεφρώνεται σε θερμοκρασία 1000 – 1200 °C σε μία αντίδραση απορρόφησης θερμότητας.



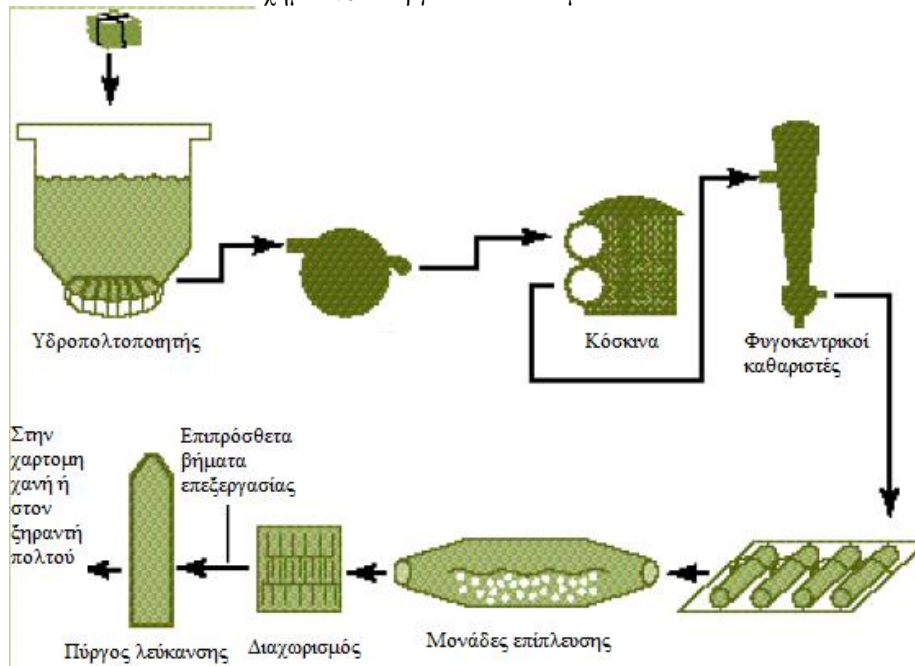
Τα αέρια που βγαίνουν από τον κλίβανο φέρουν ασβεστόσκόνη, που πρέπει να απομακρυνθεί. Αυτό γίνεται είτε με πλυντρίδα τύπου Venturi ή με ηλεκτροστατικούς αεροκυκλώνες.

5.2.2 Διεργασίες ανάκτησης πρώτων υλών

Το Σχήμα 4.6 παρέχει ένα απλοποιημένο διάγραμμα ενός συστήματος επεξεργασίας καθαρισμού ανακτημένου χαρτιού. Το πρώτο βήμα σε όλες τις συμβατικές διεργασίες ανακύκλωσης πολτού είναι να διαχωριστούν οι ίνες στο φύλλο χαρτιού. Αυτό γίνεται σε έναν υδροπολτοποιητή, ένα μεγάλο δοχείο γεμάτο με ανακτημένο χαρτί και νερό, με έναν κινητήρα στο κάτω μέρος, που μοιάζει με γιγάντιο αναδευτή. Μελάνι, σκόνη, πλαστικά και άλλοι ρύποι επίσης αποκολλώνται από τις ίνες

χαρτιού σε αυτό το βήμα. Ακολούθως, ο μύλος εφαρμόζει μία ποικιλία μηχανικών βημάτων για το διαχωρισμό των ινών από τους ρύπους στην ιλύ του πολτού.

Σχήμα 4.6. Διεργασία ανακτώμενων ινών



Πηγή: Gaudreault Caroline, 2003

Ο εξοπλισμός του μηχανικού διαχωρισμού περιλαμβάνει κόσκινα, φυγοκεντρικούς διαχωριστές, και μονάδες διαχωρισμού και ζύμωσης που διασπών τα σωματίδια μελάνης.

Τα απόβλητα που δεν ανακυκλώνονται απευθείας πίσω στη διεργασία παραγωγής μπορούν να περάσουν από λειτουργίες ανάκτησης πηγών σε μία μονάδα. Αυτή η μονάδα χρησιμοποιείται όχι μόνο για την ανάκτηση ινών αλλά και πληρωτικών ουσιών. Συνήθως αφαιρεί 30 – 60% BOD. Όμως, ο εξοπλισμός της που γενικά είναι αποτελεσματικός στην αφαίρεση αιωρούμενης ύλης, δεν μπορεί να απομακρύνει αραιωμένες οργανικές ουσίες. Οι οργανικές ουσίες που παραμένουν στο φιλτραρισμένο διάλυμα μπορεί να περιλαμβάνουν ίνες, άμυλα, κόμμι κτλ. Δυστυχώς αυτές οι ουσίες προκαλούν μείωση των συγκεντρώσεων οξυγόνου.

Ο πρωταρχικός σκοπός των μονάδων αυτών είναι η ανάκτηση υλικών, αλλά αν τα απόβλητα διυλιστούν σωστά, μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σαν φρέσκο νερό από τις μονάδες.

Η ιλύς βιομηχανίας χάρτου συχνά περιέχει σημαντικό ποσοστό κυτταρίνης και αργίλου ή διοξειδίου του τιτανίου. Έχουν γίνει προσπάθειες για μείωση του όγκου ιλύος με ανάκτηση των ινών ή των πληρωτικών μετάλλων ή και των δύο.

Παρότι η ανάκτηση επαναχρησιμοποιήσιμων υλικών από την ιλύ μπορεί να επιτευχθεί, η βιομηχανία πιο συχνά χρησιμοποιεί μέτρα ελέγχου απωλειών στους μύλους σαν το πρωταρχικό μέτρο ανάκτησης πρώτων υλών. Τέτοιες πρακτικές μπορούν ουσιαστικά να μειώσουν τις ίνες και τα άλλα στοιχεία που περιέχει η ιλύς. Ο βαθμός στον οποίο κάποιοι μύλοι εφαρμόζουν αυτές τις πρακτικές μπορούν να επηρεάσουν τα πιθανά πλεονεκτήματα ανάκτησης υλικού αποβλήτων από την ιλύ.

Υπάρχουν πολλά μέσα ανάκτησης πρώτων υλών από την ιλύ. Ένα από τα πιο συνήθη είναι η ανακύκλωση πρωτεύοντος ιλύος πίσω στο σύστημα επεξεργασίας ινών του μύλου. Οι μύλοι ανακυκλωμένου χαρτονιού συχνά χρησιμοποιούν αυτήν την τεχνική. Κάποιοι κατασκευαστές λευκασμένου και μη πολτού και χαρτιού έχουν επίσης εφαρμόσει αυτήν την μέθοδο με περιορισμένη επιτυχία. Διαχωρισμένα λύματα από μηχανές χαρτιού, σταθμούς λεύκανσης, και άλλες καθαριστικές

λειτουργίες μπορεί να είναι καλοί στόχοι για ανάκτηση ινών επειδή συχνά έχουν έλλειψη προσμίξεων, όπως φλοιού ή καυστικών στερεών αποβλήτων.

Η χρήση κάποιας κλασματοποίησης για την ιλύ μπορεί επίσης να συμβάλλει στην ανάκτηση ινών μόνο. Η πολυπλοκότητα των συστημάτων ανάκτηση ινών ποικίλλει και εξαρτάται από την φύση των συστατικών στην ιλύ. Η τελική διαμόρφωση των περισσότερων συστημάτων συνεπάγεται από ένα συνδυασμό έρευνας, δοκιμής και λάθους. Μύλοι που παράγουν λευκασμένο πολτό μερικές φορές προσθέτουν ανακτημένη ίνα στον μη λευκασμένο πολτό που εισέρχεται στον σταθμό λεύκανσης. Αυτή η στρατηγική επιτρέπει και την ανάκτηση μη λευκασμένων ινών και τον χρωματισμό προγενέστερα λευκασμένη ίνας που μπορεί να έχει “βρομίσει” με έκθεση σε προσμίξεις από τα υγρά απόβλητα.

Η χρήση συστημάτων κλασματοποίησης θα ανακτήσει τα πληρωτικά μέταλλα. Τα περισσότερα συστήματα έχουν εφαρμόσει μία τεχνική θερμικής οξειδωσης για την καταστροφή του οργανικού κλάσματος της ιλύος και την παραγωγή των πληρωτικών στοιχείων σε μορφή “τέφρας”. Πειράματα με συστήματα ασβεστοποίησης αποκάλυψαν ότι ελέγχοντας την θερμοκρασία της καμίνου στους 816°C και 843 °C αποφεύγεται η δημιουργία λιωμένων συγκραμάτων που μπορεί να κάνει το ανακτημένο πληρωτικό μέταλλο πιο τραχύ.

Η οξείδωση με υγρό αέρα επίσης θα ανακτήσει πληρωτικά μέταλλα από την ιλύ. Είναι μία αντίδραση οξείδωσης που γίνεται σε υγρό περιβάλλον υπό υψηλή θερμοκρασία και πίεση. Η διεργασία είναι ικανή για την μείωση του όγκου ιλύος μέσω οξείδωσης του οργανικού κλάσματος και την παραγωγή τέφρας, που αποτελείται από αδρανή υλικά, όπως άργιλο, διοξείδιο τιτανίου και ανθρακικό ασβέστιο, που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν στην διαδικασία κατασκευής χαρτιού. Όμως, παρατηρούνται προβλήματα με το θειικό ασβέστιο και την χαμηλή ευκρίνεια του ανακτημένου πληρωτικού μετάλλου.

Οι διεργασίες ανάκτησης λειτουργούν ως φιλτράρισμα (φίλτρα περιστροφικών δίσκων ή φίλτρα τύμπανα) ή επίπλευση. Η επιλογή του συστήματος εξαρτάται από την ποσότητα χαρτιού που παράγεται, τις απαιτήσεις αφαίρεσης ουσιών, το ποσό νερού που επιθυμείται να επανακυκλοφορεί και τον χρόνο διεξαγωγής.

5.2.2.1 Φιλτράρισμα για ανάκτηση πρώτων υλών

Διάφοροι τύποι εξοπλισμού φιλτραρίσματος χρησιμοποιούνται σήμερα σε σταθμούς για να καθαρίσουν και να επαναχρησιμοποιήσουν τα απόβλητα. Μία από τις πιο βασικές μορφές φιλτραρίσματος είναι το κοσκίνισμα. Χρησιμοποιώντας επικλινή συρμάτινα κόσκινα, τα απόβλητα περνούν μέσω των ανοιγμάτων. Το κόσκινο αφαιρεί τις μακρύτερες, πιο πολύτιμες ίνες και αφήνει τις μικρότερες και τα πληρωτικά υλικά να περάσουν. Το νερό που παραλαμβάνεται από αυτή τη διεργασία είναι κακής ποιότητας και μπορεί να επαναχρησιμοποιηθεί για αραίωση φορτίου ή να εκκενωθεί.

Όπως τα επικλινή κόσκινα, κακή ποιότητας νερό παράγεται και από τα περιστροφικά και τύπου τυμπάνου.

Φίλτρα κενού βασίζονται στη δημιουργία κενού και προκαλούν τη ροή του απόβλητου μέσω του φίλτρου. Το κυλινδρικό φίλτρο περιστρέφεται σε δεξαμενή και έχει αποτελεσματικότητα αφαίρεσης 92 – 97,5% για χαρτί με 6.5 – 19% τέφρα. Οι ανακτώμενες ίνες στέλνονται σε δεξαμενή – στοκ αποθήκευσης και το διαυγασμένο νερό σε ψεκαστήρες.

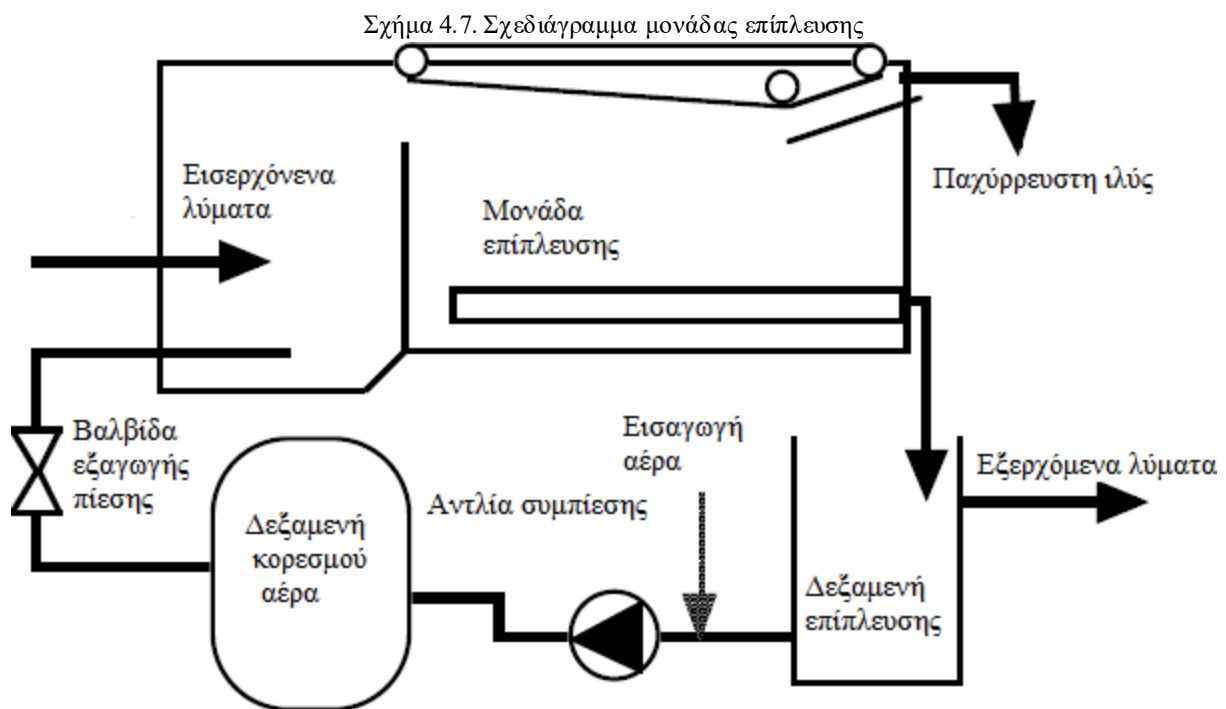
Τα φίλτρα δίσκου είναι μία μορφοποίηση του φίλτρου κενού. Οι δίσκοι αποτελούνται από έναν αριθμό αυλακωμένων τμημάτων καλυμμένων με μέσο φιλτραρίσματος. Αυτοί οι δίσκοι περιστρέφονται μέσα σε δεξαμενή αποβλήτων. Καθώς το τμήμα του δίσκου εισέρχεται στο νερό, εφαρμόζεται κενό. Έτσι, απορροφάται νερό μέσω του μέσου φιλτραρίσματος. Καθώς το στρώμα ινών στο φίλτρο σχηματίζεται, το νερό καθαρίζεται και έχει περιεκτικότητα στερεών μικρότερη από 50 mg / L. Καθώς ο δίσκος περιστρέφεται εκτός του απόβλητου, το κενό σταματά να λειτουργεί, και το στρώμα ινών

αφαιρείται και εισάγεται ξανά στη διαδικασία κατασκευής χαρτιού. Αυτό το σύστημα παρέχει καλό διαυγασμένο νερό σε ελάχιστο χρόνο.

Οι δεξαμενές, που χρησιμοποιούν καθίζηση βαρύτητας, είναι αναποτελεσματικές για την ανάκτηση πρώτων υλών. Επίσης, απαιτούν και μεγάλο χώρο.

5.2.2.2 Επίπλευση για ανάκτηση πρώτων υλών

Τα συστήματα επίπλευσης χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση στερεών από τα απόβλητα μειώνοντας την πυκνότητά τους χρησιμοποιώντας επίπλευση αέρα. Ένα σχεδιάγραμμα της διεργασίας επίπλευσης φαίνεται στο Σχήμα 4.7. Ο αέρας διαλύεται στο νερό, σχηματίζοντας μικροσκοπικές φυσαλίδες όταν η πίεση μειώνεται. Αυτές οι φυσαλίδες προσαρτούνται στα αιωρούμενα στερεά. Αυτό προκαλεί μείωση της βαρύτητας της συσσωρευμένης αιωρούμενης ύλης σε σχέση με το νερό. Όταν αυτό συμβαίνει, η μάζα ανεβαίνει στην επιφάνεια και σχηματίζει μία επιπλέουσα ιλύ που μπορεί να αφαιρεθεί. Το διαυγασμένο νερό μπορεί έπειτα να τραβηχτεί από τον πάτο της δεξαμενής και να επαναχρησιμοποιηθεί ή να εκκενωθεί.



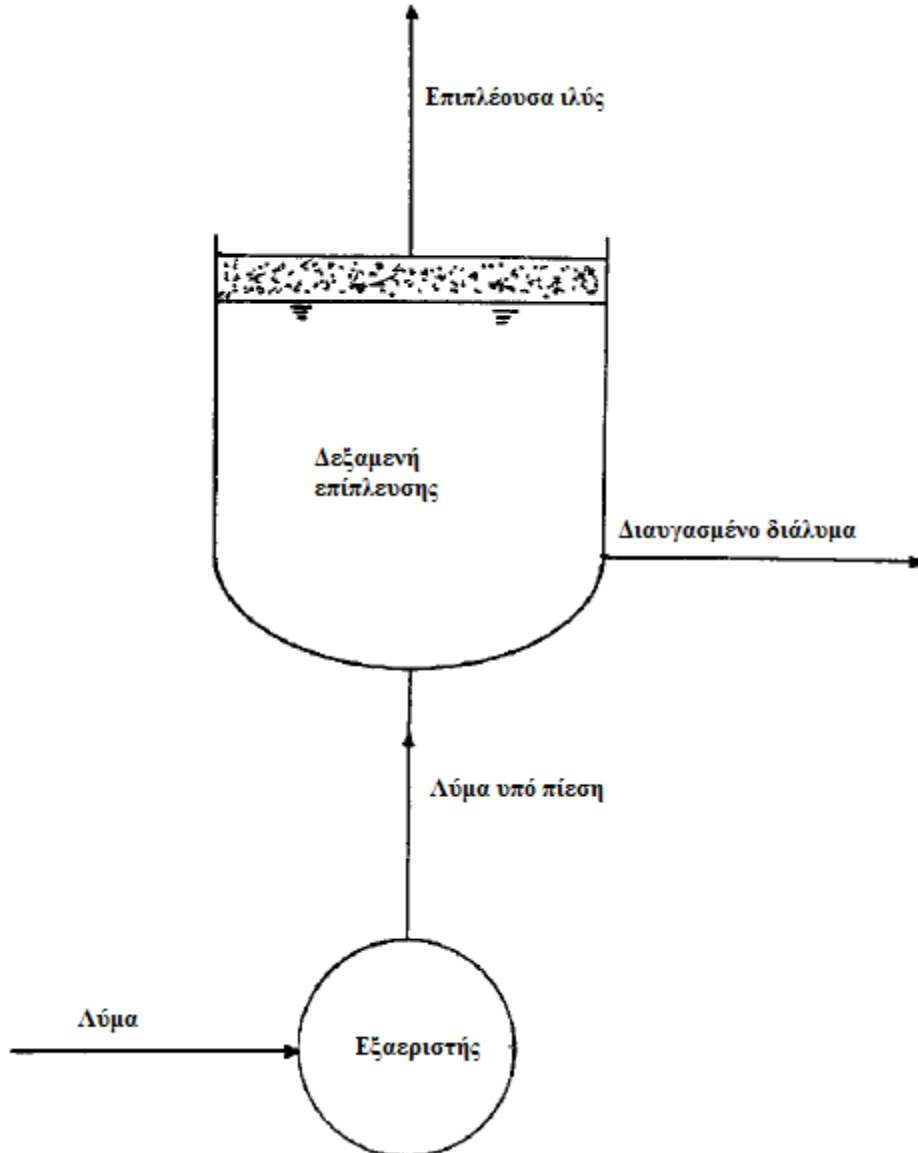
Πηγή: Gaudreault Caroline, 2003

Πιο συνηθισμένα, αέρας (όγκου 1- 2%) διαλύεται στο νερό υπό υψηλή πίεση (40 – 60 psi) σε ένα θάλαμο. Η υψηλή πίεση προκαλεί στο νερό να γίνει υπερκορεσμένο. Το απόβλητο μετά απελευθερώνεται στη δεξαμενή με ατμοσφαιρική πίεση. Λόγω της χαμηλότερης πίεσης, φυσαλίδες αέρα σχηματίζονται, παγιδεύουν τα αιωρούμενα υλικά και ανεβαίνουν.

Υπάρχουν τρία είδη συστημάτων επίπλευσης που λειτουργούν υπό ατμοσφαιρική πίεση: συμπίεση πλήρους ροής, συμπίεση μερικής ροής και συμπίεση ανακυκλωμένης ροής. Αυτά τα συστήματα φαίνονται στο Σχήμα 4.8, Σχήμα 4.9 και Σχήμα 4.10. (Wang Lawrence K., 2010)

Ολόκληρο το απόβλητο περνά μέσω ενός εξαεριστή που χρησιμοποιεί συμπίεση πλήρους ροής. Αυτή η μέθοδος δουλεύει πολύ καλά με αιωρούμενα υλικά που συσσωρεύονται γρήγορα στη δεξαμενή επίπλευσης. Όταν αυτό συμβαίνει, οι φυσαλίδες αέρα μπορούν εύκολα να παγιδευτούν στους κόκκους και αυτό προκαλεί πολύ καλές ικανότητες διαχωρισμού.

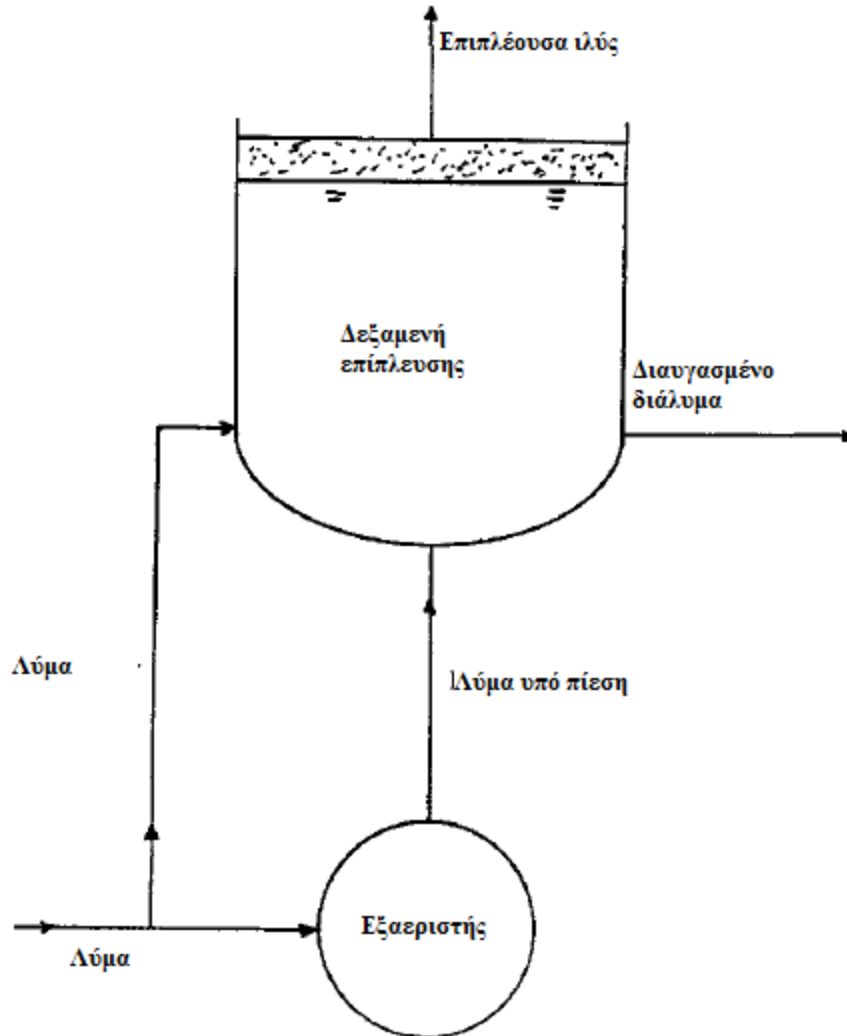
Σχήμα 4.8. Είδος επίπλευσης με συμπίεση πλήρους ροής



Πηγή: Wang Lawrence K., 2010

Στην συμπίεση μερικής ροής, μόνο 30 – 50% του αποβλήτου περνά μέσω του εξαεριστή. Το υπόλοιπο στέλνεται κατευθείαν στη δεξαμενή επίπλευσης. Το πεπιεσμένο απόβλητο έπειτα ελευθερώνεται στη δεξαμενή που περιέχει το ασυμπιεσμένο. Αυτό το σύστημα λειτουργεί καλά σε αιωρούμενα υλικά με χαμηλή πυκνότητα και χαμηλή συγκέντρωση. Επειδή συμπιέζεται μικρότερη ροή, τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης είναι μειωμένα.

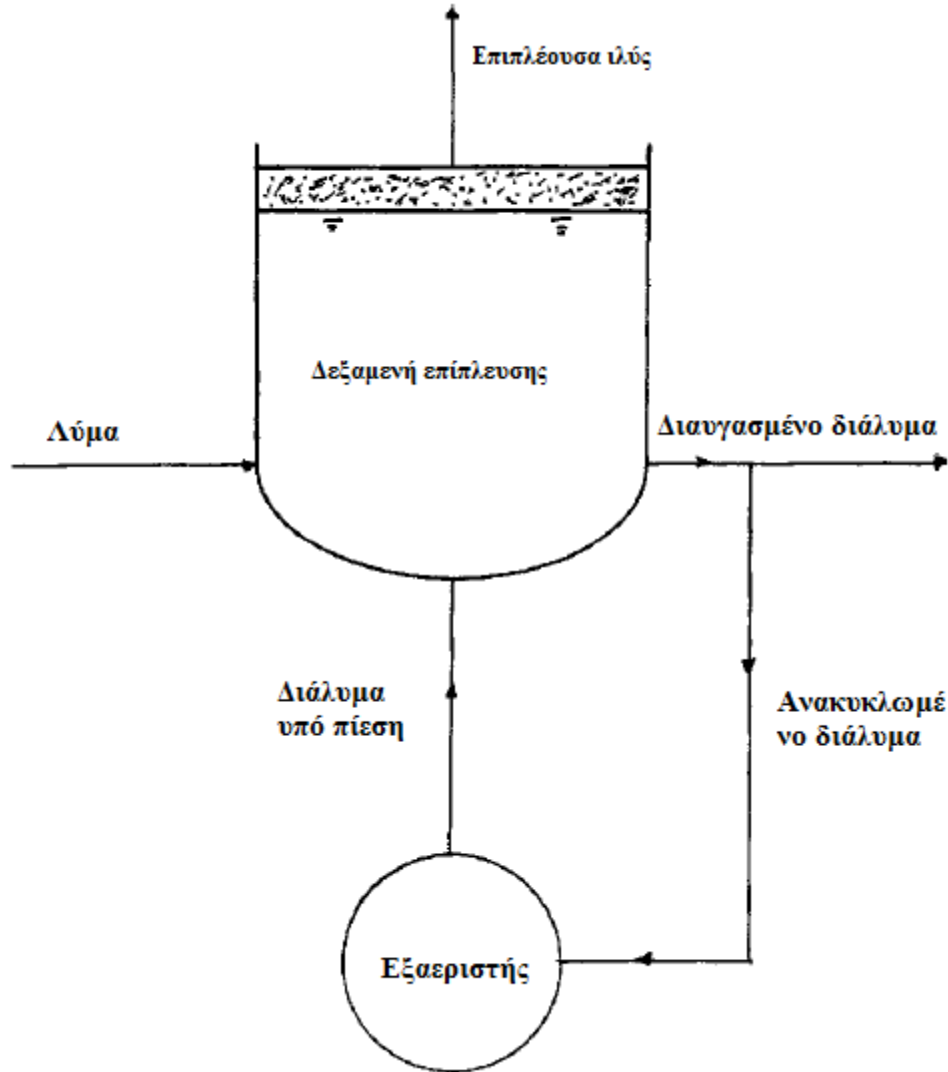
Σχήμα 4.9. Είδος επίπλευσης με συμπίεση μερικής ροής.



Πηγή: Wang Lawrence K., 2010

Στο σύστημα συμπίεσης ανακύκλωσης ροής, 15 – 50% του διαυγασμένου διαλύματος από τη δεξαμενή επίπλευσης συμπιέζεται και ανακυκλώνεται πίσω σε αυτήν.

Σχήμα 4.10. Είδος επίπλευσης με συμπίεση ανακύκλωσης ροής



Πηγή: Wang Lawrence K., 2010

Αναφέρεται ότι οι ίνες μπορούν εύκολα να ανακτηθούν με ή χωρίς χημική προσθήκη χρησιμοποιώντας τον τρόπο συμπίεσης πλήρους ροής. Όταν διοξείδιο του τιτανίου προστέθηκε στο απόβλητο, η πλειονότητα των ινών και σχεδόν 50% του διοξειδίου τιτανίου ανακτούνται. Χρησιμοποιώντας τη μέθοδο συμπίεσης ανακύκλωσης ροής, 99% διοξείδιο τιτανίου και ίνες ανακτώνται.

5.2.3 Σύστημα λευκού νερού

Εκτιμάται ότι 2 – 75 m³ νερού χρειάζονται για κάθε τόνο χαρτιού (Πίνακας 4.2) που παράγεται από σταθμούς χάρτου. Από συνδυασμό σταθμών πολτού και χάρτου, 10 – 300 νερού χρειάζονται για κάθε τόνο χαρτιού. Τα απόβλητα περιέχουν πολύτιμες πρώτες ύλες. Λόγω του αυξανόμενου κόστους των πρώτων υλών και των έλεγχου ρύπανσης, έχει γίνει οικονομικά ευνοϊκή η ανάκτηση των πρώτων υλών από τα απόβλητα και η επαναχρησιμοποίηση του φιλτραρισμένου νερού. Η χρήση νερού από τη βιομηχανία πολτού και χάρτου μειώνεται σταθερά τα τελευταία 50 χρόνια.

Πίνακας 4.2. Εκτίμηση κατανάλωσης νερού για παραγωγή χαρτιού

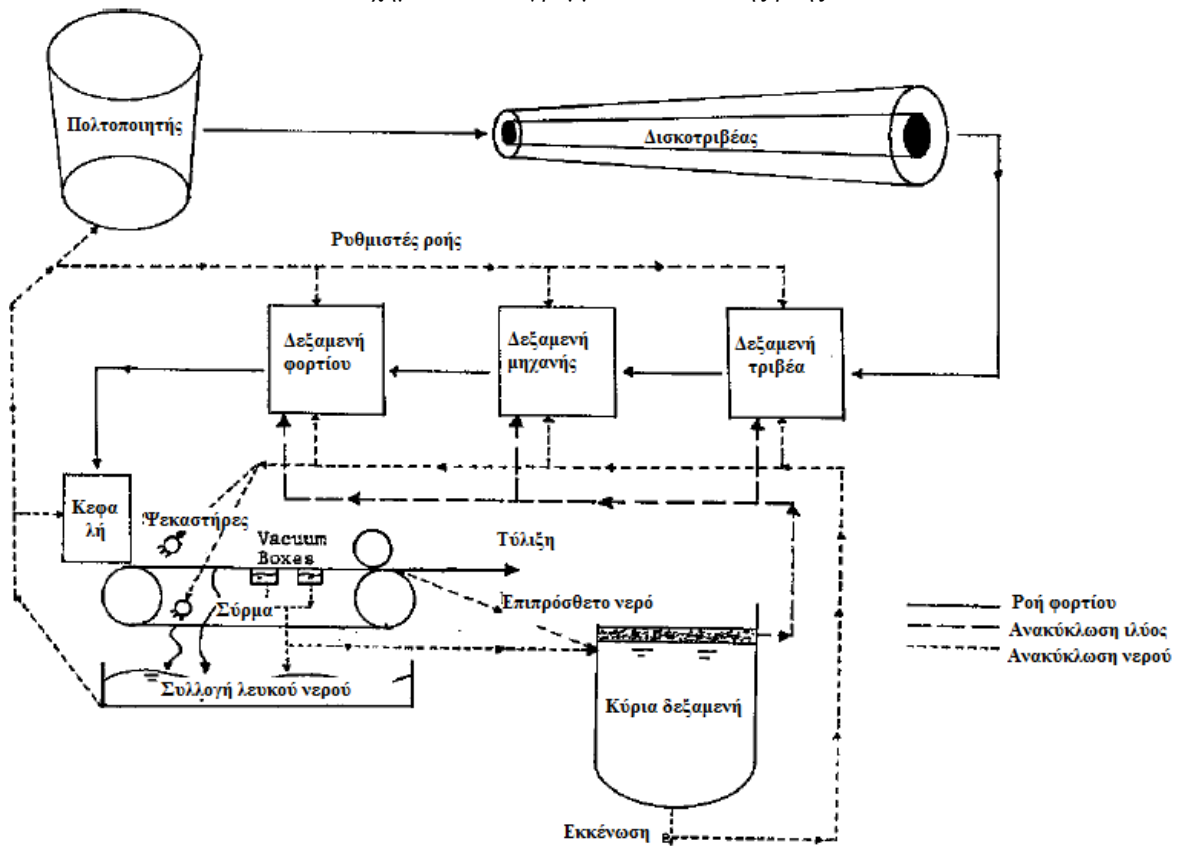
Είδος χαρτιού	Κατανάλωση νερού (m ³ /τόνο)
Εκτύπωσης και γραφής	40–75
Χαρτομάνηλο	57
Εφημερίδα	24–35
Συσκευασίας και χαρτόνι	2–20

Πηγή: Wang Lawrence K., 2010

Μεγάλοι όγκοι νερού επεξεργάζονται στο μύλο χαρτιού κατά την παραγωγή του. Το Σχήμα 4.11 δείχνει την ανακύκλωση λευκού νερού σε ένα τυπικό μύλο χαρτιού. Το λευκό νερό που συλλέγεται κάτω από το σύρμα, είναι πλούσιο σε ίνες και πληρωτικά υλικά, και χρησιμοποιείται για το σχηματισμό ιλός του εισερχόμενου ξηρού πολτού και για να κάνει τις συνεπακόλουθες αραιώσεις στις δεξαμενές τριβέα, πολτοαιωρήματος, στην κεφαλή ή σε άλλα σημεία ως επιπρόσθετο νερό για τη ρύθμιση του φορτίου. Το νερό που συλλέγεται από τους θαλάμους κενού συγκεντρώνεται στις δεξαμενές ανάκτησης, από όπου τροφοδοτούνται οι ψεκαστήρες.

Μέσα ανάκτησης ως περιστροφικά κόσκινα ή τύπου τυμπάνου περιστρέφονται σε δεξαμενή με λευκό νερό. Το νερό περνά από το κόσκινο και ένα στρώμα ιών σχηματίζεται στο σύρμα.

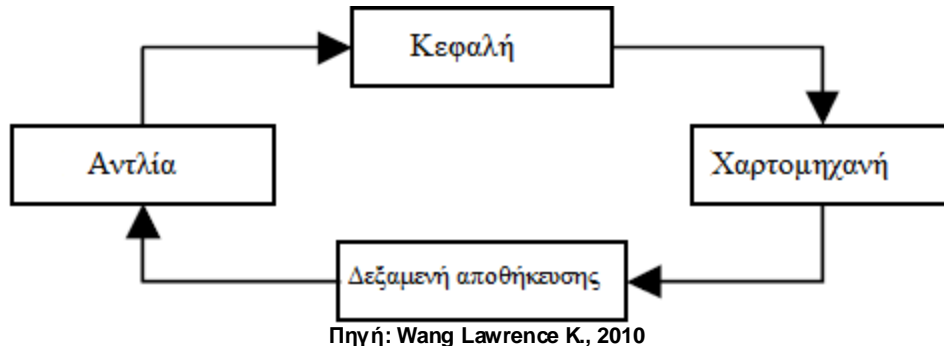
Σχήμα 4.11. Διάγραμμα ανακύκλωσης ροής



Πηγή: Wang Lawrence K., 2010

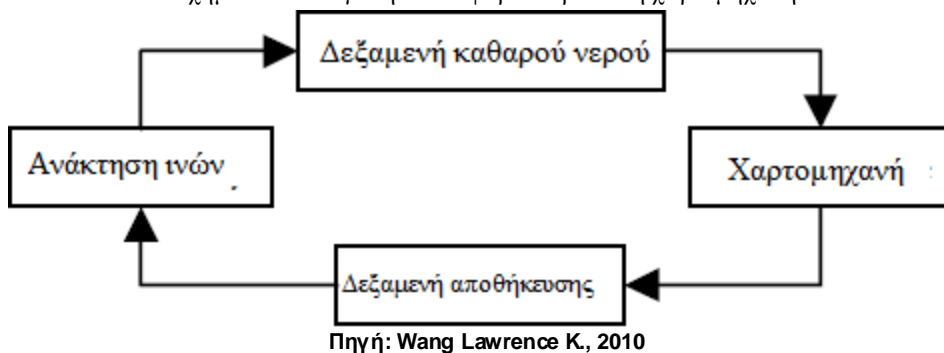
Υπάρχουν δύο κύριες ροές λευκού νερού στο μύλο χαρτιού, η μικρή και η μεγάλη κυκλοφορία. Η μικρή κυκλοφορία είναι η ροή του λευκού νερού από την κεφαλή κατά μήκος του σύρματος, τη δεξαμενή συλλογής κάτω από το σύρμα και την αντλία (Σχήμα 4.12).

Σχήμα 4.12. Μικρή κυκλοφορία νερού στη χαρτομηχανή



Το νερό από τα σημεία αναρρόφησης και πίεσης εισάγεται στη μεγάλη κυκλοφορία και συλλέγεται στη δεξαμενή αναρρόφησης. Αυτό το λευκό νερό χρησιμοποιείται για τον έλεγχο επιπέδου στις δεξαμενές συλλογής νερού κάτω από το σύρμα. Ένα μέρος αυτού επίσης επεξεργάζεται στην κύρια δεξαμενή, που είναι μία φυσική συσκευή για καθαρισμό, συνήθως ένα δισκοφίλτρο. Αυτό το καθαρισμένο λευκό νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί στους ψεκαστήρες. Ένα σχεδιάγραμμα για μεγάλη κυκλοφορία φαίνεται στο Σχήμα 4.13.

Σχήμα 4.13. Μεγάλη κυκλοφορία νερού στη χαρτομηχανή



Παρά τα πλεονεκτήματα επαναχρησιμοποίησης του μέγιστου ποσού αποβλήτου, πολλοί σταθμοί εκκενώνουν μέρος του για να εμποδίσουν την ανάπτυξη διαλυμένων ουσιών στο σύστημα, που μπορεί να καταστρέψει την ποιότητα χαρτιού όπως και τη λειτουργία της μηχανής. Για να ελαχιστοποιηθούν αυτές οι συνέπειες, σωστές εγκαταστάσεις αποθήκευσης νερού πρέπει να διατηρούνται που να εμποδίζουν τη μικροβιακή αποσύνθεση ή καθίζηση των στερεών πριν το λευκό νερό χρησιμοποιηθεί. Αυτό γίνεται με τα κλειστά συστήματα.

5.2.3.1 Σύνθεση λευκού νερού

Η σύνθεση του λευκού νερού εξαρτάται από διάφορους παράγοντες, όπως την πρώτη ύλη, το παραγόμενο προϊόν και το είδος της χαρτομηχανής. Παρόλο που δεν είναι δυνατόν να δοθεί ακριβής περιγραφή της σύνθεσης, είναι δυνατή η αναφορά κάποιων ουσιών που μπορούν να βρεθούν στο λευκό νερό, που είτε εμφανίζονται ως μόρια ή είναι διαλυμένες στο νερό και αποτελούν και οργανικές και ανόργανες ουσίες.

Πρώτα από όλα, το νερό περιέχει πολλές ίνες που δεν παραμένουν στο σύρμα κατά την παραγωγή χαρτιού. Κατά την επεξεργασία πολλού κάποιες από τις ίνες σπάνε σε μικρότερα κομμάτια. Αυτά τα κομμάτια μπορούν να αποσυντεθούν έτσι ώστε μικρές αλυσίδες πολυσακχαριτών να διαλύονται στο λευκό νερό. Εκτός από τις ίνες υπάρχουν πολλές άλλες ουσίες που προέρχονται από τον πολτό. Όταν παρθένες ίνες χρησιμοποιούνται, ουσίες όπως μονοσακχαρίτες, δισακχαρίτες, ρητινικά και λιπαρά οξέα μπορούν να μεταφερθούν στο λευκό νερό.

Η κατασκευή χαρτιού είναι πολύ πολύπλοκη και πολλά διαφορετικά χημικά χρησιμοποιούνται. Όλα αυτά τα χημικά μπορούν να βρεθούν στο λευκό νερό. Παρόλο ότι πολλά χημικά προστίθενται στο τελευταίο τμήμα της κατασκευής χαρτιού, δηλαδή κατά τη ξήρανση, μικρές ποσότητες καταλήγουν στο σύστημα νερού.

Η σύνθεση λευκού νερού από ένα μύλο ανακυκλωμένου χαρτιού με κατανάλωση νερού $1 \text{ m}^3 /$ τόνο χαρτιού μπορεί να βρεθεί στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3. Σύνθεση λευκού νερού σε μύλο ανακυκλωμένου χαρτιού

Παράμετροι	Συγκέντρωση	Μονάδα
COD	35 000	mg/l
Ca	3 700	mg/l
Θειούχες ενώσεις	1 500	mg/l
Χλώριο	550	mg/l
Ακετικό οξύ	5 000	mg/l
Προπιονικό οξύ	700	mg/l
Βουτυρικό οξύ	400	mg/l
Γαλακτικές ενώσεις	5 800	mg/l
pH	6.25	
Αγωγιμότητα	9.0	MS/cm

Πηγή: Wang Lawrence K., 2010

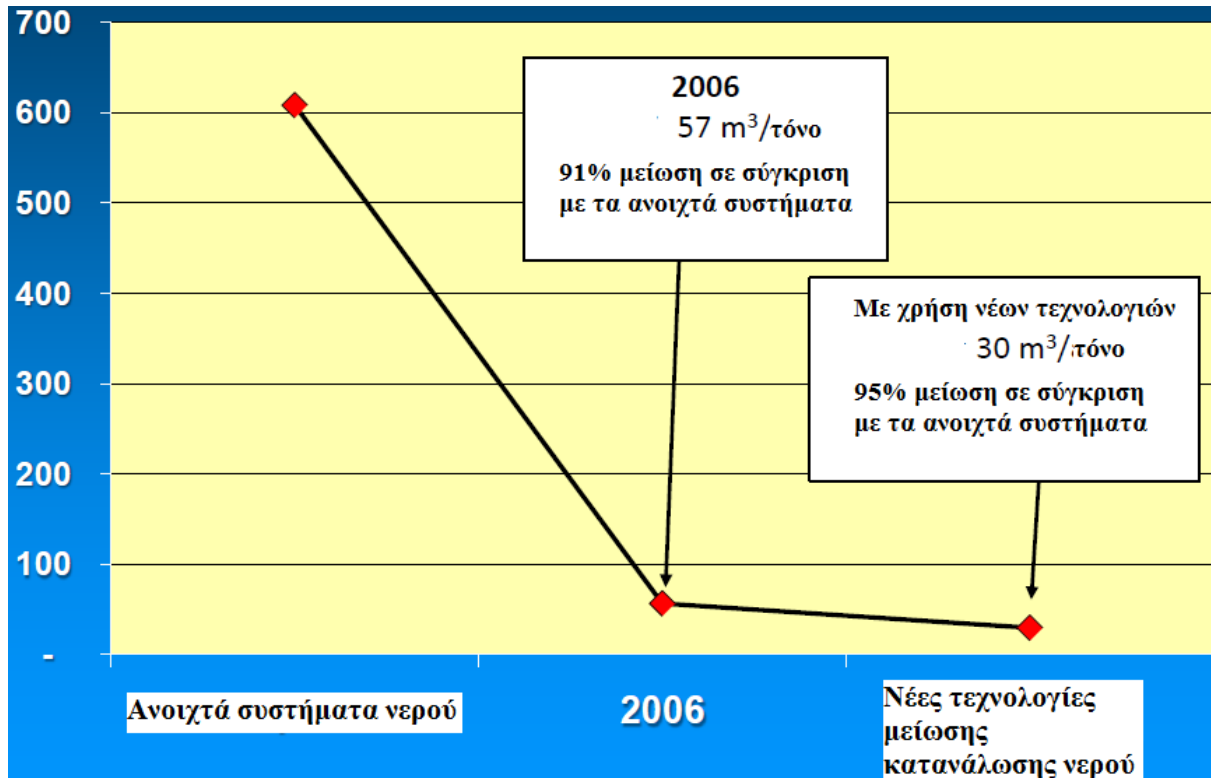
5.2.4 Κλειστά συστήματα

Η βιομηχανία πολτού και χάρτου αντιμετωπίζει αυξημένη περιβαλλοντική πίεση για τη μείωση της κατανάλωσης νερού και των εκκενώσεων χλωριωμένων ενώσεων. Το γεγονός αυτό οδήγησε σε αρκετές αλλαγές στους σταθμούς, όπως είναι και η δημιουργία κλειστών συστημάτων επεξεργασίας. Η ροή αποβλήτων σε αυτόν το βιομηχανικό τομέα έχει μειωθεί 80 – 90% μέσω της επανακυκλοφορίας νερού και ο μοναδικός στόχος των μύλων κλειστού κύκλου είναι να έχουν ελάχιστο αντίκτυπο στο περιβάλλον.

Τα κλειστά συστήματα δεν εκκενώνουν απόβλητα. Αποτελούν μια μορφή ελέγχου πρόληψης ρύπανσης στην οποία τα υγρά απόβλητα ελαχιστοποιούνται ανακυκλώνοντας τα πίσω στη διεργασία. Επομένως, δεν υπάρχουν διαλυμένα ή φιλτραρισμένα στερεά, βακτήρια ή τοξικά υλικά. Τα στερεά αφήνουν το σύστημα ως ιλύ. Ο όγκος του νερού που περιέχεται σε ένα κλειστό σύστημα πρέπει να κρατείται στο ελάχιστο. Προτείνεται ο όγκος νερού που επεξεργάζεται να μην είναι μεγαλύτερος από τον όγκο νερού που εξατμίζεται στις διεργασίες ξήρανσης στις τρεις μέρες. Αυτό εμποδίζει το νερό να

μείνει στο σύστημα πολύ, που προκαλεί πρόβλημα με τα βακτήρια. Εκτός από τα περιβαλλοντικά οφέλη, το μερικό κλείσιμο των συστημάτων έχει αρκετά πλεονεκτήματα όπως τη μείωση κόστους επεξεργασίας αποβλήτων, τη μείωση κατανάλωσης νερού (Σχήμα 4.14) και ατμού και την εξοικονόμηση της ινώδους ύλης.

Σχήμα 4.14. Χρήση νερού και επαναχρησιμοποίηση σε μύλους πολτού και χάρτου



Πηγή: Wang Lawrence K., 2010

Επίσης, ως αποτέλεσμα του κλεισίματος των συστημάτων, οι μύλοι πολτού εκκενώνουν πιο ζεστά και συγκεντρωμένα λύματα. Έτσι, αυτά απαιτούν ένα στάδιο ψύξης που θεωρείται ακριβό και ενεργοβόρο πριν τη βιολογική επεξεργασία αφού η τελευταία λειτουργεί σε μεσοφιλικές θερμοκρασίες (20 – 35°C).

5.2.4.1 Προβλήματα κλειστών συστημάτων

Προβλήματα που συνδέονται με τα κλειστά συστήματα περιλαμβάνουν την ανάπτυξη ουσιών που διαβρώνουν τον εξοπλισμό και υποβαθμίζουν την ποιότητα χαρτιού. Αυτά τα προβλήματα μειώνονται από μικρότερες προσθήκες διαβρωτικών υλικών, μικρότερο όγκο νερού που επεξεργάζεται και μικρούς βρόχους επανακυκλοφορίας για να μειώσουν την ανάπτυξη μικροβίων και τη χρήση δεξαμενών με επίπλευση για να διατηρούν τις συνθήκες αερόβιες.

5.2.4.1.1 Ανάπτυξη μικροβίων

Πολλά από τα προβλήματα που εμφανίζονται σε ένα κλειστό σύστημα νερού οφείλονται στους μικροοργανισμούς. Όταν το σύστημα νερού είναι κλειστό, οργανικές ενώσεις συσσωρεύονται και δρουν ως υπόστρωμα για τους μικροοργανισμούς. Αυτοί αρχίζουν να αναπτύσσονται στο νερό και επίσης στις επιφάνειες του συστήματος ως βιομεμβράνες. Με το χρόνο, οι μεμβράνες γίνονται πιο παχιές και μπορούν να αποκολληθούν από την επιφάνεια. Αυτά τα κομμάτια μεμβρανών στο νερό

εισέρχονται στη μηχανή χαρτιού και διαδίδονται στο σύρμα. Έτσι καταλαμβάνουν χώρο, που θα έπρεπε να χρησιμοποιείται από ίνες. Η διαδικασία ξήρανσης μειώνουν τα κομμάτια βιομεμβρανών και αφήνουν μία τρύπα στο χαρτί. Αυτό φυσικά χειροτερεύει την ποιότητα του προϊόντος.

Το σύστημα νερού είναι αρκετά μεγάλο με σωλήνες και διαφορετικές δεξαμενές. Σε κάποιες θέσεις στη διεργασία, το νερό εκτίθεται σε αέρα και το οξυγόνο διαλύεται σε αυτό. Οι μικροοργανισμοί καταναλώνουν το οξυγόνο και ένα περιβάλλον χωρίς οξυγόνο κατάλληλο για αναερόβιους μικροοργανισμούς δημιουργείται. Όταν το οξυγόνο καταναλώνεται πλήρως και δεν υπάρχει άλλος λήπτης ηλεκτρονίου, οι μικροοργανισμοί αρχίζουν τη ζύμωση. Σε αυτή, διαφορετικά πτητικά λιπαρά οξέα παράγονται. Κάποια από αυτά έχουν πολύ δυσάρεστη οσμή. Η συσσώρευση τέτοιου είδους ενώσεων μπορεί να οδηγήσει σε άσχημο λειτουργικό περιβάλλον.

5.2.4.1.2 Διάβρωση

Το κλείσιμο του συστήματος νερού οδηγεί σε συσσώρευση ανόργανων ιόντων και ενέργειας, που με τη σειρά της οδηγεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες στο νερό. Υψηλή θερμοκρασία σε συνδυασμό με υψηλή συγκέντρωση ανιοντικών ιόντων δημιουργεί δαιβρωτικές συνθήκες. Θεωρείται ότι η διαβρωτική φύση του περιβάλλοντος στο νερό αυξάνει με αυξημένα επίπεδα διαφορετικών ανόργανων ιόντων.

Η μεταβολική δραστηριότητα των μικροοργανισμών μπορεί επίσης να οδηγήσει σε διάβρωση. Στο νερό υπό αναερόβιες συνθήκες, πτητικά λιπαρά οξέα όπως ακετικό οξύ, προπιονικό οξύ και βουτυρικό οξύ παράγονται και είναι όλα διαβρωτικές ενώσεις.

5.2.4.1.3 Εκρήξεις

Εκρήξεις με θανατηφόρα αποτελέσματα έχουν συμβεί σε διάφορους μύλους χαρτιού. Σε δεξαμενές και δοχεία με ακόμα νερό διεργασίας, το περιβάλλον αλλάζει πολύ γρήγορα σε περιβάλλον χωρίς οξυγόνο, που είναι ιδανικό για βακτήρια παραγωγής υδρογόνου. Κατά τη διάρκεια συνήθων λειτουργικών συνθηκών, το λευκό νερό κινείται συνεχώς σε επαφή με τον αέρα, που το αερίζει επαρκώς, κάνοντας το ακατάλληλο για τους παραγωγούς υδρογόνου.

5.2.4.2 Αντιμετώπιση των προβλημάτων

Υπάρχουν αρκετές διαφορετικές λύσεις στα προβλήματα που προκύπτουν λόγω του κλεισίματος ενός συστήματος νερού. Φυσικές, χημικές και βιολογικές μέθοδοι έχουν χρησιμοποιηθεί για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων.

5.2.4.2.1 Βιοκτόνα

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος ελέγχου της ποσότητας των μικροοργανισμών στο σύστημα λευκού νερού είναι με την πρόσθεση βιοκτόνων. Η πρόσθεση βιοκτόνου συχνά συνδυάζεται με τη δοσολογία ενός φορέα διαχωρισμού, που διασπά τη συσσώρευση μικροοργανισμών έτσι ώστε τα βιοκτόνα να μπορούν να δουλέψουν σωστά. Επίσης ένζυμα χρησιμοποιούνται μαζί με βιοκτόνα.

Τα περισσότερα βιοκτόνα είναι κάποιο είδος οργανικών μορίων και υπάρχουν πολλά διαφορετικά είδη. Συνήθη παραδείγματα διαφορετικών τύπων είναι τα οργανοβρομίδια, οι χλωριωμένες φαινόλες κτλ. Ανόργανα μόρια επίσης χρησιμοποιούνται ως βιοκτόνα. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το διοξείδιο του χλωρίου, που αναφέρεται ως αποτελεσματική ένωση για την αντιμετώπιση βακτηρίων. Άλλο παράδειγμα είναι το όζον, που έχει δοκιμαστεί σε λευκό νερό.

5.2.4.2.2 Εξάτμιση

Τα λύματα από τη διεργασία πολτοποίησης αρχικά φιλτράρονται και μετά επεξεργάζονται σε μονάδα επίπλευσης. Το νερό οδηγείται σε δεξαμενή ανάκτησης, που λειτουργεί ως μονάδα αποθήκευσης. Όταν υπάρχει ανάγκη, νερό από τη δεξαμενή φιλτράρεται και μετά επεξεργάζεται σε βραστήρα. Η τεχνολογία βραστήρα που χρησιμοποιείται είναι μηχανική ανασυμπίεση ατμών. Το απόσταγμα μετά από περεταίρω βιολογικό καθαρισμό οδηγείται σε δεξαμενή εξισορρόπησης και είναι έτοιμο για επαναχρησιμοποίηση. Τα στερεά από το βραστήρα συγκεντρώνονται και στέλνονται σε λέβητα ανάκτησης.

Αυτό έχει οδηγήσει σε μειωμένη ζήτηση νερού στη χαρτομηχανή και μειώνει τον όγκο λυμάτων στην παραγωγική γραμμή.

5.3 Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές

Η Ευρωπαϊκή ένωση έχει αναπτύξει κάποιες οδηγίες που περιλαμβάνουν αναφορές στις Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές (Best Available Techniques - BATs) για τις βιομηχανίες πολτού και χαρτιού. Για να θεωρηθεί μία τεχνολογία BAT, πρέπει να αναπτυχθεί σε μία κλίμακα που να επιτρέπει εφαρμογή κάτω από οικονομικά και τεχνικά βιώσιμες συνθήκες, στον αντίστοιχο βιομηχανικό τομέα.

Κάποιες από τις BATs που προτείνονται για τους μύλους πολτού έτσι ώστε να μειωθούν η κατανάλωση νερού και ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος είναι η ξηρή αποφλοιώση του ξύλου, η αποτελεσματική έκπλυση, η ECF και TCF λεύκανση κτλ. Η πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια επεξεργασία υγρών αποβλήτων προτείνεται όπως και μερικές φορές η χημική καθίζηση και κροκίδωση για τη μηχανική πολτοποίηση και την επεξεργασία ανακυκλωμένων ινών. Οι BATs που προτείνονται για την κατασκευή χαρτιού είναι παρόμοιες με αυτές της παραγωγής πολτού: ελαχιστοποίηση της χρήσης νερού και χημικών, κατασκευή ισορροπημένου συστήματος λευκού νερού, ξεχωριστή προ – επεξεργασία των υγρών αποβλήτων που φέρουν επιχρίσεις, πρωτοβάθμιες και δευτεροβάθμιες επεξεργασίες υγρών αποβλήτων, και σε κάποιες περιπτώσεις χημική καθίζηση και κροκίδωση.

Στον Πίνακα 4.4, παρουσιάζονται τα επίπεδα εκπομπών που έχουν καθοριστεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση με την χρήση των BATs σε μύλους χαρτιού.

Πίνακας 4.4. Επίπεδα εκπομπών που ορίζονται από ΕΕ με την χρήση BATs σε μύλους χαρτιού

Παράμετροι	Μονάδες	Χαρτί χωρίς επικαλύψεις	Χαρτί με επικαλύψεις	Χαρτομάνηλο
BOD ₅	kg/t χαρτιού	0.15–0.25	0.15–0.25	0.15–0.4
COD	kg/t χαρτιού	0.5–2	0.5–1.5	0.4–1.5
TSS	kg/t χαρτιού	0.2–0.4	0.2–0.4	0.2–0.4
AOX	kg/t χαρτιού	<0.005	<0.005	<0.01
Συνολικός φώσφορος	kg/t χαρτιού	0.003–0.01	0.003–0.01	0.003–0.015
Συνολικό άζωτο	kg/t χαρτιού	0.05–0.2	0.05–0.2	0.05–0.25
Ροή αποβλήτων	M ³ /t χαρτιού	10–15	10–15	10–25

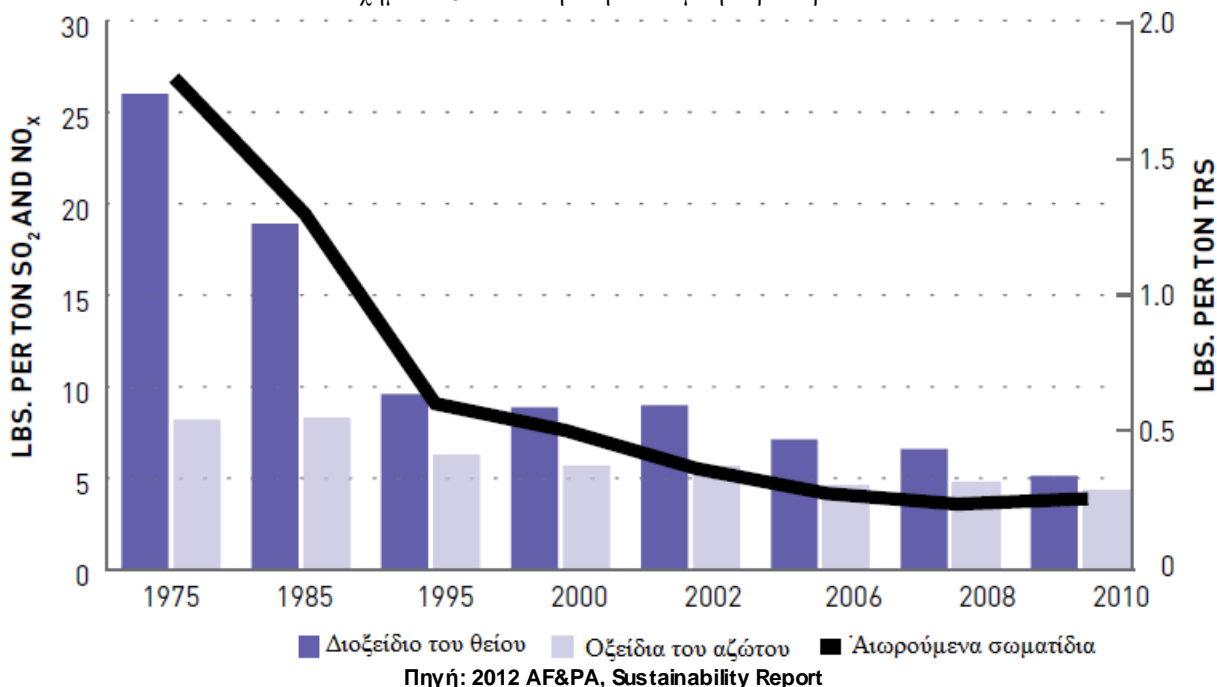
Πηγή: Wang Lawrence K., 2010

5.3.1 Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές για την ελαχιστοποίηση αέριων αποβλήτων

Κάποια απόβλητα στα οποία χρησιμοποιούνται οι BATs για την ελαχιστοποίησή τους είναι οι αέριοι ρύποι των διοξεινών και φουράνων, που περιέχονται στην τέφρα, η οποία παράγεται από την καύση στους λέβητες, τα οξείδια του αζώτου και το διοξείδιο του θείου. Έτσι, στο Σχήμα 4.15

εμφανίζεται η μείωση που παρουσιάζεται στην εκπομπή αέριων ρύπων στη διάρκεια των τελευταίων χρόνων.

Σχήμα 4.15. Μείωση στην εκπομπή αέριων ρύπων

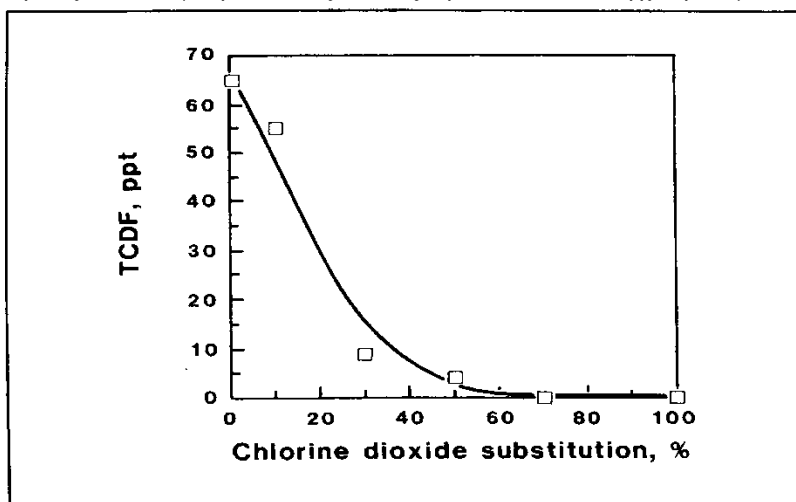


5.3.1.1 Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές για την ελαχιστοποίηση διοξινών και φουρανών

Όσο πιο πλήρης είναι η καύση ξύλου, τόσο χαμηλότερη είναι η πιθανότητα σχηματισμού διοξινών και φουρανών. Μεγιστοποιώντας τις θερμοκρασίες καύσης (διατηρώντας το κόστος) μπορεί να είναι μία αποτελεσματική στρατηγική για τη μείωση της παραγωγής τους. Έχει αποδειχθεί ότι μία θερμοκρασία των 850 °C με χρόνο έκθεσης 2 sec μπορεί να παρεμποδίσει θερμικά το σχηματισμό τους. Ο χρόνος που τα απαέρια και οι άκαυστες ουσίες περνούν σε θερμοκρασίες 200 – 500 °C πρέπει να ελαχιστοποιηθεί, αφού αυτές οι τιμές είναι ιδανικές για το σχηματισμό διοξινών και φουρανών. Η καύση επίσης ουσιών που περιέχουν θείο μαζί με το ξύλο ώστε να μειωθεί ο λόγος χλωρίου – θείου έχει βρεθεί αποτελεσματική για τη μείωση σχηματισμού τους. Όμως, η διάβρωση και η έμφραξη του λέβητα είναι αρνητικές συνέπειες. Οι Duo και Leclerc περιέγραψαν πως η παρουσία θείου σε χαμηλό επίπεδο μπορεί πραγματικά να βελτιώσει το σχηματισμό διοξινών και φουρανών, ενώ υψηλότερες συγκεντρώσεις εμποδίζουν το σχηματισμό αυτό. Επίσης, η πρόσθεση αμμωνίας φαίνεται αποτελεσματική για το σκοπό αυτό.

Στα μέσα του 1980, άρχισε εκτενής έρευνα για το λόγο ύπαρξης διοξινών και φουρανών που οφείλεται στη χρήση χλωρίου στη διεργασία λεύκανσης. Ο σχηματισμός αυτών των ρύπων μειώνεται αυξάνοντας την αντικατάσταση του χλωρίου με διοξείδιο του χλωρίου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 4.16.

Σχήμα 4.16. Μείωση διοξινών και φουρανών αυξάνοντας την αντικατάσταση χλωρίου με διοξείδιο του χλωρίου



Πηγή: 2012 AF&PA, Sustainability Report

5.3.1.2 Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές για ελαχιστοποίηση οξειδίων του αζώτου

Η ελάττωση των εκπομπών NO_x επιτυγχάνεται με τη διατήρηση χαμηλών θερμοκρασιών φλόγας και καύσης στον κλιβανο, όπως και ζωνών με αναγωγική ατμόσφαιρα. Ο ακριβής έλεγχος της περισσειας οξυγόνου είναι επίσης κρίσιμος παράγοντας στην ελάττωση των εκπομπών NO_x . Γενικά, όσο χαμηλότερη είναι η περισσεια οξυγόνου στο άκρο του περιστροφικού κλιβάνου, τόσο λιγότερο NO_x παράγεται. Παρόλα αυτά, απαιτείται προσεκτικός έλεγχος, ώστε να μην αυξηθούν τα ποσοστά CO και SO_2 . Η χρήση των ανωτέρω μεθόδων ελέγχου έχει αναφερθεί ότι μπορεί να οδηγήσει σε μειώσεις εκπομπών NO_x μέχρι και 30%.

5.3.1.3 Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές για ελαχιστοποίηση διοξειδίου του θείου

Η μείωση των εκπομπών SO_2 επιτυγχάνεται με τη μείωση της πτητικότητας του SO_2 σε χαμηλότερες θερμοκρασίες καύσης και φλόγας και οξειδωτική ατμόσφαιρα εντός κλιβάνου με τη διατήρηση σταθερής λειτουργίας του περιστροφικού κλιβάνου που ευνοούν τη δέσμευσή του SO_2 από τα οξείδια Mg, Na, Ca, K κ.λπ. Η μεγαλύτερη μείωση εκπομπών SO_2 μπορεί να επιτευχθεί στους μακρούς κλιβάνους υγρής ή ξηράς μεθόδου. Η ομαλή και σταθερή λειτουργία του κλιβάνου και η αποφυγή των διακυμάνσεων που μπορεί να επιτευχθεί με την αυτόματη ρύθμιση και την αριστοποίηση οδηγεί σε λιγότερες υπερβάσεις των επιτρεπόμενων ορίων συγκεντρώσεων CO στα καυσαέρια (CO trips) που έχουν ως αποτέλεσμα το σταμάτημα των ηλεκτροστατικών φίλτρων για λόγους ασφάλειας (αποφυγή έκρηξης) και την εκπομπή μεγάλων ποσοτήτων σκόνης. Εκτιμάται ότι το 50% ή και περισσότερες από τις συνολικές εκπομπές σκόνης από τις καμινάδες των περιστροφικών κλιβάνων προέρχονται από τα CO trips.

Η προσεκτική επιλογή όλων των υλικών που εισέρχονται στο σύστημα του κλιβάνου (καυσίμων και α' υλών) μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλη ελάττωση των εκπομπών ρύπων. Η επιλογή του καυσίμου επηρεάζει τις εκπομπές του κλιβάνου και ιδιαίτερα τις εκπομπές του SO_2 , όπως και τις εκπομπές βαρέων μετάλλων. Επίσης, η απουσία χλωρίου και οργανικών ενώσεων στα καύσιμα βοηθά στην εξάλειψη των εκπομπών χλωριωμένων διοξινών και φουρανών.

5.3.1.4 Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές για ελαχιστοποίηση μονοξειδίου του άνθρακα (CO)

Οι εκπομπές CO και υδρογονανθράκων πρωταρχικά συνδέονται με την ποσότητα αέρα στον κλίβανο και τις συνθήκες καύσης.

Το μονοξείδιο του άνθρακα σχηματίζεται από τον άνθρακα που περιέχεται στα καύσιμα στην περίπτωση ατελούς καύσης. Συνθήκες καύσης που οδηγούν σε αυξημένα επίπεδα CO επίσης προκαλούν αυξημένες εκπομπές υδρογονανθράκων. Για την επίτευξη μίας πλήρους και αποτελεσματικής καύσης και την ελαχιστοποίηση των εκπομπών του CO και των υδρογονανθράκων, οι ακόλουθες παράμετροι κλιβάνου και καύσης πρέπει να ελεγχθούν:

- Ποσότητα οξυγόνου
- Θερμότητα θαλάμου
- Μείγμα αέρα καυσίμου και καύσης
- Χρόνος παραμονής

Η καύση που ευνοεί χαμηλές εκπομπές CO απαιτεί τη χρήση υψηλής θερμοκρασίας θαλάμου και την επαρκή τροφοδότηση με οξυγόνο για πλήρη αποτέφρωση οργανικών ουσιών. Η μείωση της περιεκτικότητας σε CO απαιτεί μία ελεγχόμενη τροφοδότηση αέρα καύσης. Η περίσσεια όμως αέρα καύσης τείνει να αυξήσει την εκπομπή NO_x. Επομένως, ο στόχος να κρατηθούν οι εκπομπές των CO και NO_x χαμηλές, έρχεται σε αντίφαση. Ο έλεγχος των συνθηκών καύσης και του αέρα καύσης είναι επομένως ένα σημαντικό στοιχείο στον έλεγχο του CO.

5.3.1.5 Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές για ελαχιστοποίηση ανηγμένων θεικών ενώσεων (TRS)

Για τον έλεγχο των εκπομπών των ανηγμένων θεικών ενώσεων τα παρακάτω εσωτερικά μέτρα πρέπει να παρθούν.

5.3.1.5.1 Οξείδωση μαύρου διαλύματος

Η κύρια πηγή εκπομπών στη διεργασία kraft είναι ο λέβητας ανάκτησης. Μία από τις κύριες αιτίες υψηλού ρυθμού εκπομπών είναι η απελευθέρωση αερίων θείου κατά την εξάτμιση.

Η κεντρική ιδέα είναι η οξείδωση όλων των ενώσεων TRS πριν την εξάτμιση έτσι ώστε να μην εκκενωθούν. Η οξείδωση μπορεί να εφαρμοστεί είτε σε ασθενές ή σε ισχυρό μαύρο διάλυμα, και μπορεί να χρησιμοποιηθεί αέρας ή μοριακό οξυγόνο. Έχει αναφερθεί μείωση των TRS μεγαλύτερη από 80%.

Επίσης οι Strahbien και Grace (1982) βρήκαν ότι αυτή η διεργασία μπορεί να βοηθήσει στον περιορισμό της παραγωγής SO₂ στο φούρνο ανάκτησης.

Υπάρχουν κάποια μειονεκτήματα στην οξείδωση του μαύρου διαλύματος (Sarkanen, 1970):

- Κάποιες ενώσεις παραμένουν πτητικές και δύσσομες
- Ατελής οξείδωση και αναστροφή είναι πιθανή
- Η θερμαντική αξία του μαύρου διαλύματος μειώνεται
- Το αέριο που δημιουργείται από τη διεργασία οξείδωσης μπορεί να περιέχει πτητικές θεικές ενώσεις

5.3.1.5.2 Λέβητες ανάκτησης χαμηλής οσμής

Τα μειονεκτήματα της οξείδωσης μαύρου διαλύματος έπεισαν πολλούς μύλους για τη χρήση λέβητα ανάκτηση με μικρές οσμές.

Σε αυτό το σύστημα, ο εξατμιστής απευθείας επαφής δεν χρησιμοποιείται και το μαύρο διάλυμα συγκεντρώνεται από 50% σε 65% μέσω ενός άλλου είδους εξατμιστή εξαναγκασμένης

κυκλοφορίας. Έπειτα τροφοδοτείται σε ένα λέβητα ανάκτησης, που έχει διαφορετική σχεδίαση από αυτόν που χρησιμοποιείται για την καύση του διαλύματος από έναν εξατμιστή απευθείας επαφής επειδή τα αέρια από τον φούρνο βγαίνουν από την καμινάδα από το να κατευθύνονται προς τον εξατμιστή.

5.3.1.5.3 Κανονική λειτουργία του φούρνου ανάκτησης

Πλήθος ερευνών έχουν διεξαχθεί για τον καθορισμό της επιρροής των μεταβλητών λειτουργίας του φούρνου ανάκτησης στην εκπομπή δύσσομων θεικών ενώσεων από τη ζώνη καύσης. Οι περισσότεροι ερευνητές συμφωνούν στις παρακάτω οδηγίες (Smook, 1982):

- Το φορτίο στο φούρνο δεν πρέπει να ξεπερνά ένα καλά ορισμένο «κρίσιμο επίπεδο». Στην περίπτωση υπερφορτωμένου λέβητα ανάκτησης, ένας αποτεφρωτήρας ρευστοποιημένης κλίνης πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την καύση της περίσσειας του μαύρου διαλύματος. Αυτό μπορεί να εγκατασταθεί με σημαντικά λιγότερο κόστος από ένα επιπρόσθετο λέβητα ανάκτησης.
- Ο πρωτογενής αέρας δεν πρέπει να ξεπερνά το 65% του συνολικού τροφοδοτούμενου αέρα στο φούρνο.
- Η περίσσεια οξυγόνου πρέπει να ελέγχεται στο εύρος 2% – 2.5%. Οι εκπομπές TRS αυξάνουν πάνω από το 2%, ενώ κάτω από 2.5%, μπορεί να υπάρχουν προβλήματα με το σχηματισμό SO₃ και κolloειδών σωματιδίων.

5.3.2 Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές για την ελαχιστοποίηση υλός

Η ευρύτερη εφαρμογή της διεργασίας ενεργούς υλός στους μύλους πολτού και χάρτου συνδυασμένη με την αυξημένη παραγωγή έχει οξύνει τα προβλήματα διαχείρισης υλός. Ενώ η ετήσια παραγωγή υπολειμμάτων υλός συνεχίζει να αυξάνει, οι συμβατικές μέθοδοι διαχείρισης της όπως η απόθεση σε χωματερή, η αποτέφρωση και κάποιες ωφέλιμες χρήσεις έχουν έρθει αντιμέτωπες με την αντίθεση των πολιτών και με αυστηρότερη πίεση ως προς τη νομοθεσία.

Με το κόστος διαχείρισης της υλός να φτάνει στο 60% του συνολικού λειτουργικού κόστους των συστημάτων επεξεργασίας αποβλήτων, και με τους όλο και πιο αυστηρούς περιβαλλοντικούς κανονισμούς, θεωρείται οικονομικό πλεονέκτημα των μύλων πολτού και χάρτου να μειώσουν την παραγωγή υλός.

Έτσι, αρχίζουν να εφαρμόζονται σενάρια παραγωγής λιγότερης υλός μέσω αλλαγών στη σχεδίαση και / ή τις λειτουργικές παραμέτρους διεργασιών.

5.3.2.1 Εκτεταμένος αερισμός

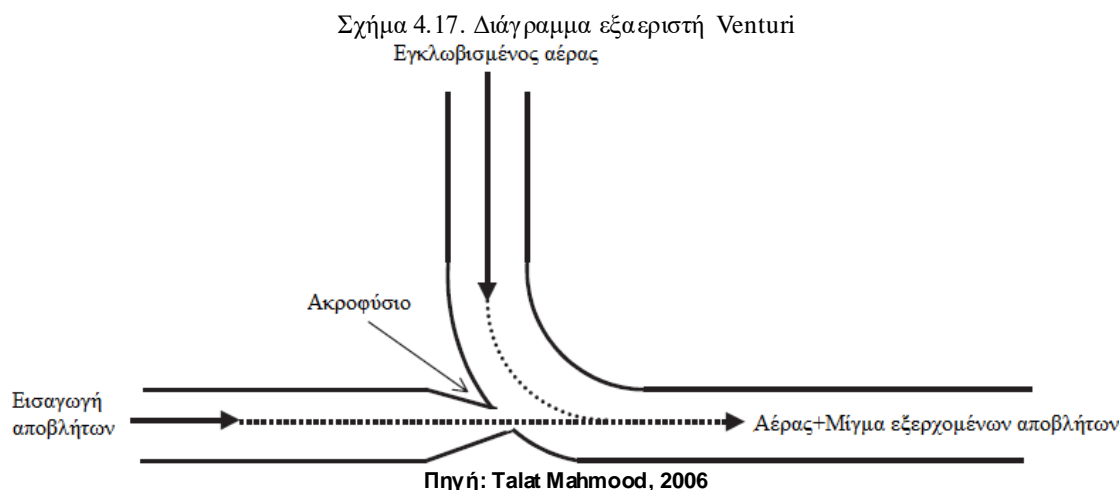
Θεωρητικά, δεν παράγεται περίσσεια υλός στη διεργασία εκτεταμένου αερισμού αφού ο ρυθμός ανάπτυξης νέων κυττάρων ισούται με το ρυθμό αποσύνθεσης των υπαρχόντων κυττάρων. Στην πράξη, όμως, παράγεται παραπάνω υλός αλλά σε σημαντικά μικρότερες ποσότητες.

5.3.2.2 Βελτιωμένος αερισμός

Μία προσέγγιση μείωσης της υλός είναι η βελτίωση του αερισμού. Οι περιορισμοί της μεταφοράς οξυγόνου του συμβατικού εξοπλισμού αερισμού συχνά εμποδίζουν τη χρήση αυτής της προσέγγισης αφού πρέπει να υπάρχει επαρκές διαλυμένο οξυγόνο στο σύστημα για να ικανοποιηθούν οι ανάγκες των βακτηρίων.

Σχετικά πρόσφατα, διαφορετικά σχέδια εξοπλισμού αερισμού έχουν προταθεί. Ένα διάγραμμα ενός εξαεριστή Venturi φαίνεται στο Σχήμα 4.17, που περιλαμβάνει ένα ακροφύσιο που εισάγει τα απόβλητα σε μία δεξαμενή. Ο εγκλωβισμένος αέρας, εξαιτίας της μεγάλης διάτμησης, καθώς έρχεται

σε επαφή με τα απόβλητα, διαλύεται σε μικρές φυσαλίδες. Τα μεγέθη των φυσαλίδων ευνοούν τη μεταφορά οξυγόνου. (Talat Mahmood, 2006)



5.3.2.3 Προσθετικά

Η αποσύνθεση βιολογικής ύλης μπορεί να αυξηθεί με την πρόσθεση ουσιών ή βιοδιεγερτικών. Αυτά τα προϊόντα γενικά θεωρούνται ότι είναι ένζυμα που προωθούν το μεταβολισμό και / ή διεγερτικά θρεπτικά συστατικά. Το φολικό οξύ (βιταμίνη Β) θεωρείται ότι δρα με παρόμοιο τρόπο για τη μείωση της ιλύος.

5.3.3 Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές για την ελαχιστοποίηση υγρών αποβλήτων

Για τη μείωση του συνολικού όγκου οργανικής και ανόργανης ύλης στα απόβλητα των μύλων πολτού και χάρτου, διαφορετικά είδη τεχνολογιών λυμάτων είναι διαθέσιμα και πρέπει να εφαρμοστούν.

Το ποια τεχνολογία για κάθε σταθμό πρέπει να εφαρμοστεί εξαρτάται από τα παρακάτω στοιχεία:

- Τα χαρακτηριστικά των λυμάτων
- Τις κλιματολογικές συνθήκες
- Τις οριακές τιμές για τις εκκενώσεις που δεν πρέπει να ξεπεραστούν
- Τα μέτρα που έχουν ήδη παρθεί

5.3.3.1 Ξηρή αποφλοιώση

Στον χειρισμό ξύλου οι εκκενώσεις οργανικών ενώσεων και αιωρούμενων σωματιδίων μπορούν να μειωθούν με την ξηρή αποφλοιώση. Οι υγροί αποφλοιωτές περιστρέφουν τους κορμούς σε μία ποσότητα νερού και αφαιρούν το φλοιό χτυπώντας τον κορμό στην άκρη ενός τυμπάνου χρησιμοποιώντας μεγάλους όγκους νερού. Το νερό που χρησιμοποιείται σε αυτή τη διεργασία ανακυκλώνεται αλλά μία συγκεκριμένη ποσότητα χάνεται ως υπερχειλίση για την απομάκρυνση του αφαιρούμενου φλοιού. Στην υγρή αποφλοιώση 3 – 10 m³ νερού ανά τόνο πολτού εκκενώνονται. Οργανικές ενώσεις όπως ρητινικά οξέα, λιπαρά οξέα κτλ και υψηλά χρωματισμένα υλικά εκπλένονται από το φλοιό στους υδάτινους δέκτες.

Πρόσφατα η ξηρή αποφλοιώση έχει εγκατασταθεί σε πολλούς μύλους. Το νερό διεργασίας χρησιμοποιείται μόνο για έκπλυση κορμών και επανακυκλοφορεί αποτελεσματικά με ελάχιστη παραγωγή ρύπων (το φορτίο COD μπορεί να μειωθεί μέχρι 10%). Η ξηρή αποφλοιώση δημιουργεί

φλοιοό με μία χαμηλότερη περιεκτικότητα σε νερό, που θα οδηγήσει σε μία καλύτερη ισορροπία ενέργειας για το μύλο. Λιγότερο νερό χρειάζεται στην αποφλοιοώση και η διαλυμένη ποσότητα οργανικών ενώσεων μειώνεται.

Οι τυπικές εκκενώσεις της ξηρής αποφλοιοώσης φαίνονται στον Πίνακα 4.5.

Πίνακας 4.5. Φορτίο ρύπανσης απόβλητων υγρής και ξηρής αποφλοιοώσης πριν από επεξεργασία

Τεχνική αποφλοιοώσης	Όγκος αποβλήτων [m ³ /t πολτού]	BOD ₅ [kg/t πολτού]	COD [kg/t πολτού]	Φώσφορος [g/t πολτού]
Υγρή αποφλοιοώση	3 - 10	5 - 15	20 - 30	25 - 35
Ξηρή αποφλοιοώση	0.5 - 2.5	0.5 - 2.5	1 - 10	10 - 20

Πηγή: Talat Mahmood, 2006

5.3.3.2 Βελτιστοποίηση συνθηκών βρασμού

Αυτό το μέτρο εφαρμόζεται στην πολτοποίηση kraft, προσαρμόζοντας τον χρόνο παραμονή του ξύλου και τη θερμοκρασία με τέτοιο τρόπο ώστε χαμηλότερη περιεκτικότητα σε λιγνίνη να προκύπτει. Αυτό καθιστά τον πολτό πιο εύκολο στη λεύκανση. Το αποτέλεσμα είναι μικρές μειώσεις εκπομπών από τη διεργασία λεύκανσης, όπως του BOD, των ανηγμένων θεικών ενώσεων και των AOX.

5.3.3.3 Εκτεταμένη απολιγνίνωση

Η εκτεταμένη απολιγνίνωση μειώνει περεταίρω την περιεκτικότητα του πολτού σε λιγνίνη πριν αυτός μεταφερθεί στο σταθμό λεύκανσης. Επειδή η ποσότητα των χημικών λεύκανσης που απαιτείται για την επίτευξη συγκεκριμένης ευκρίνειας χαρτιού είναι ανάλογη της ποσότητας της λιγνίνης που απομένει στον πολτό μετά την πολτοποίησης, η εκτεταμένη απολιγνίνωση μπορεί να μειώσει τις ποσότητες των χρειαζόμενων χημικών λεύκανσης. Διάφορες διεργασίες εκτεταμένης απολιγνίνωσης έχουν αναπτυχθεί. Αυτές οι διεργασίες περιλαμβάνουν τα ακόλουθα:

- Αύξηση του χρόνου βρασίματος
- Πρόσθεση χημικών βρασμού σε διάφορα σημεία κατά τον βρασμό
- Εξισορρόπηση θερμοκρασιών βρασμού
- Προσεκτικός έλεγχος συγκέντρωσης ιόντων υδρογόνου και διαλυμένης λιγνίνης

Η περιεκτικότητα λιγνίνης του πολτού μειώνεται κατά 20 – 50% χωρίς απώλεια της απόδοσης ή αντοχής του πολτού. Ως αποτέλεσμα, οι χλωριωμένες ενώσεις που παράγονται κατά τη λεύκανση μειώνονται σε αναλογία με τη μείωση λιγνίνης στον πολτό. Ο Πίνακας 4.6 δίνει παραδείγματα μείωσης των AOX με εκτεταμένη απολιγνίνωση, που κυμαίνονται από 10% - 70%. Εξαιτίας των χαμηλότερων αριθμών Κάππα του πολτού που παράγεται από την εκτεταμένη απολιγνίνωση, λιγότερη λιγνίνη χρειάζεται να αφαιρεθεί από τα χημικά λεύκανσης που περιέχουν χλώριο, και λιγότερες ενώσεις AOX παράγονται όταν αυτός ο πολτός λευκαίνεται. Επιπρόσθετα, οι ίδιες αλλαγές προκαλούν μειώσεις στο BOD, COD και χρώμα. Μία έρευνα παρουσίασε μείωση BOD κατά 29% από μία διεργασία εκτεταμένης απολιγνίνωσης.

Πίνακας 4.6 Μείωση ενώσεων ΑΟΧ από εκτεταμένη απολιγνίνωση

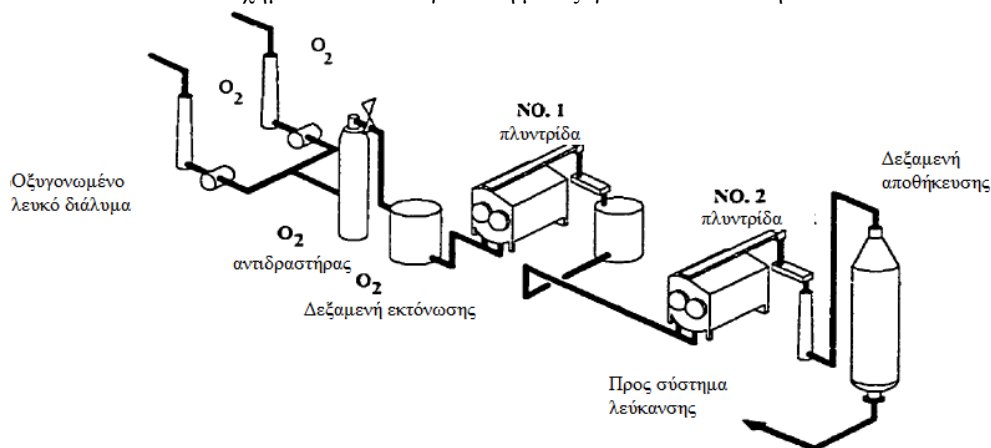
<u>Συμβατική απολιγνίνωση</u>		<u>Εκτεταμένη απολιγνίνωση</u>		
Καρρα	ΑΟΧ (kg/t)	Καρρα	ΑΟΧ (kg/t)	Μείωση ΑΟΧ (%)
33	3.1	16	1.4	55
17	1.7	8.5	0.6	65
24	2.7	11	0.9	67
18	2.3	13	2.0	13
27	3.7	21	2.4	35
32	1.9	25	1.5	21
32	5.5	25	4.5	18
18	3.5	14	2.5	29

Πηγή: Talat Mahmood, 2006

5.3.3.4 Απολιγνίνωση με οξυγόνο

Η απολιγνίνωση με οξυγόνο απομακρύνει σχεδόν μισή από τη λιγνίνη που απομένει μετά τη διαδικασία αποστείρωσης, έτσι ώστε ο αριθμός Κάπα του πολτού για μαλακή ξυλεία είναι τυπικά 12 – 18. Στη διεργασία αυτή, ο πλυμένος πολτός επεξεργάζεται με υψηλό αλκαλικό διάλυμα υδροξειδίου νατρίου. Το υψηλό pH ιονίζει φαινολικές ομάδες της λιγνίνης, που μετά δέχονται επίθεση από μοριακό οξυγόνο. Το αρωματικό μέρος της σταδιακά καταστρέφεται και μετά αποπολυμερίζεται σε ενώσεις χαμηλότερου μοριακού βάρους. Αυτές είναι πιο διαλυτές στο νερό και μπορούν να αφαιρεθούν από τις ίνες. Είναι σημαντικό ο πολτός προηγουμένως να είναι μερικώς πλυμένος επειδή τα στερεά του μαύρου διαλύματος στον άπλυτο πολτό καταναλώνουν οξυγόνο. Μετά την απολιγνίνωση με οξυγόνο, ο πολτός πρέπει να πλυθεί πολλά καλά, αλλιώς οι οργανικές ουσίες που μεταφέρονται στην τελική λεύκανση, καταναλώνουν χημικές ουσίες και επίσης μειώνουν τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα (Σχήμα 4.18).

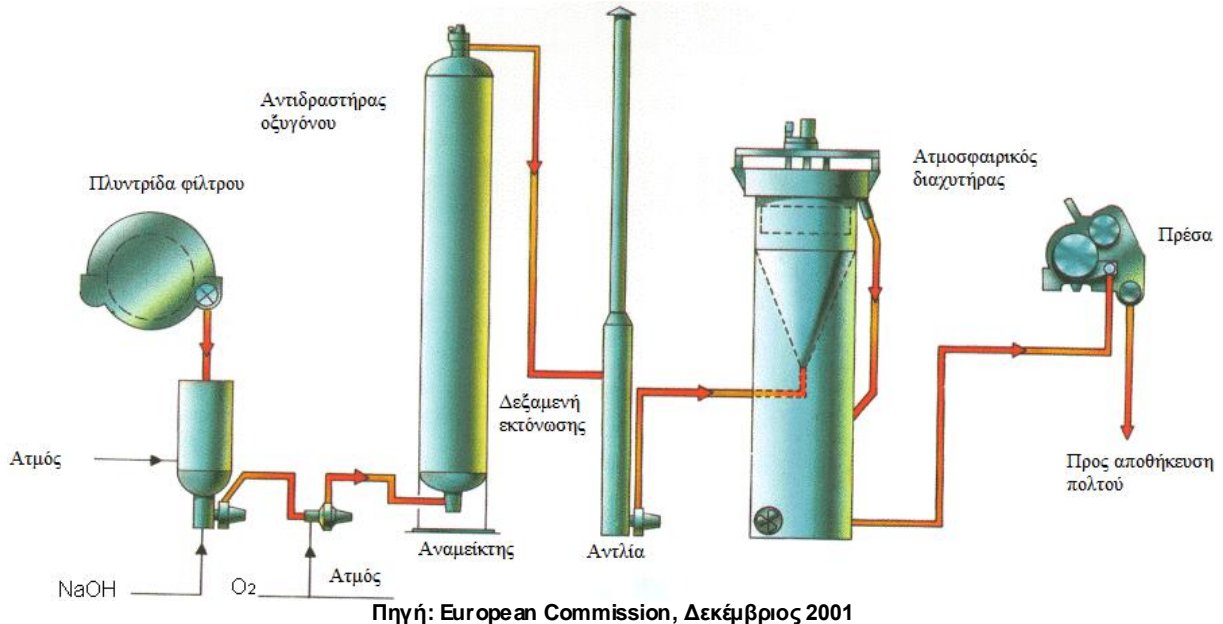
Σχήμα 4.18. Απολιγνίνωση με οξυγόνο και έκπλυση



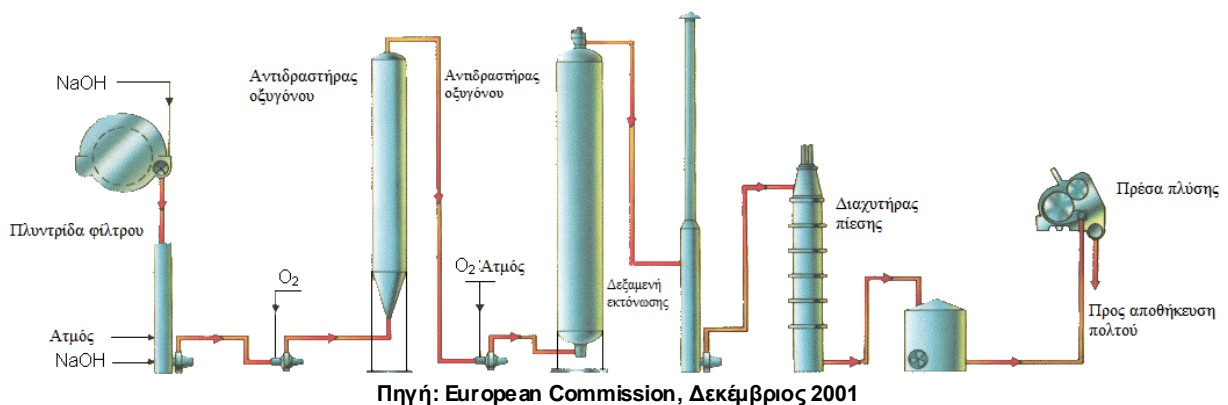
Πηγή: Talat Mahmood, 2006

Η απολιγνίνωση με οξυγόνο συμβαίνει σε ένα ή δύο στάδια μετά το βρασμό και πριν τη λεύκανση και μπορεί να πετύχει αποτελεσματικότητα απολιγνίνωσης από 40 – 60%. Μία αποτελεσματικότητα πάνω από 40% συνήθως απαιτεί εγκαταστάσεις δύο σταδίων. Στο Σχήμα 4.19 και Σχήμα 4.20 παραδείγματα για μία μοντέρνα διεργασία απολιγνίνωσης ενός και δύο σταδίων εμφανίζονται.

Σχήμα 4.19. Απολιγνίνωση με οξυγόνο ενός σταδίου

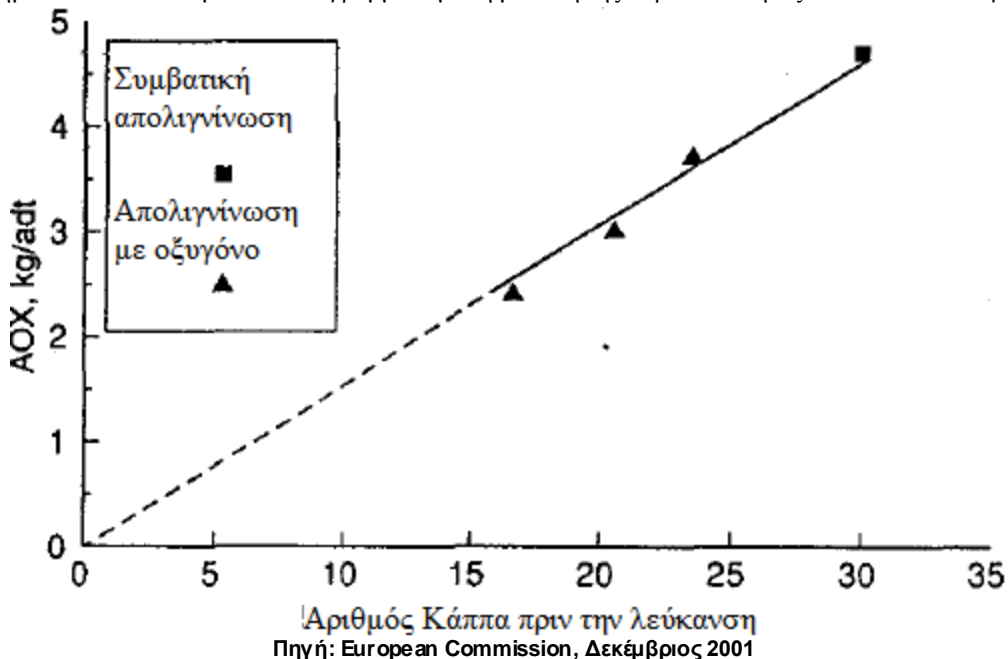


Σχήμα 4.20. Απολιγνίνωση με οξυγόνο δύο σταδίων



Το Σχήμα 4.21 δείχνει ότι, για δεδομένες συνθήκες λεύκανσης πολτού, υπάρχει μία γραμμική σχέση ανάμεσα στην περιεκτικότητα σε AOX στα διαλύματα πολτοποιήσης και την περιεκτικότητα λιγνίνης στον πολτό κατά την είσοδό του στη λεύκανση.

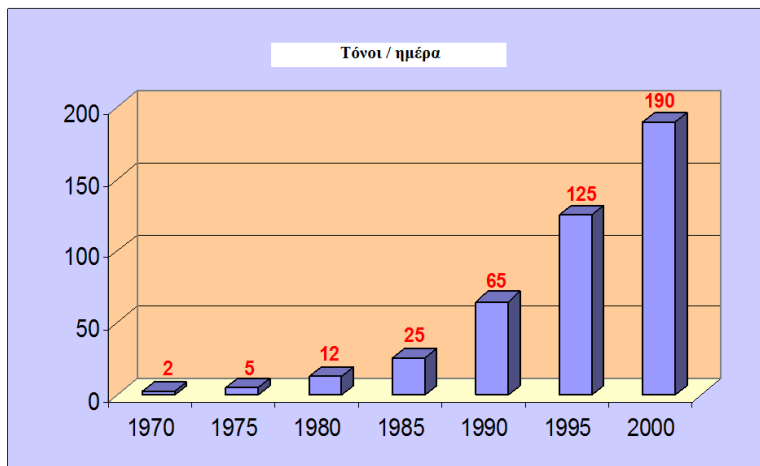
Σχήμα 4.21. Οι ΑΟΧ μειώνονται γραμμικά με τη μείωση της περιεκτικότητας του πολτού σε λιγνίνη.



Οι υψηλές αλκαλικές συνθήκες της απολιγνίνωσης με οξυγόνο επίσης κάνει κλάσματα υδατανθράκων στις ίνες να αντιδρούν με το οξυγόνο. Καθώς αυτές οι αντιδράσεις διασπών τις πολυμερικές αλυσίδες της κυτταρίνης, και έτσι μειώνουν την αντοχή του πολτού, πρέπει να κρατηθούν στο ελάχιστο. Θεωρείται ότι τα δραστικά στοιχεία του οξυγόνου είναι επιβλαβή στους υδατάνθρακες. Η διαμόρφωση των δραστικών αυτών προωθείται από την παρουσία συγκεκριμένων ιόντων μετάλλου. Όμως, θεωρείται ότι τα άλατα μαγνησίου επιβραδύνουν την δραστηριότητα αυτών των ιόντων, και επομένως το θειικό μαγνήσιο προστίθεται ως “προστάτης” την απολιγνίνωση με οξυγόνο.

Η απολιγνίνωση μπορεί να μειώσει σημαντικά την μόλυνση νερού από την τελική λεύκανση (κυρίως αυτή που βασίζεται στο χλώριο ή στο διοξείδιο χλωρίου). Επίσης, είναι μία διεργασία χωρίς απόβλητα. Όλη η διαλυμένη λιγνίνη και άλλες οργανικές ενώσεις (όπως και ανόργανες χημικές ενώσεις) ανακτώνται από το μαύρο διάλυμα και επιστρέφουν στο σύστημα χημικής ανάκτησης, από το να απελευθερωθούν ως απόβλητα. Τέλος, το οξυγόνο είναι σχετικά φθηνό χημικό λεύκανσης. Όμως, η διεργασία έχει την δυνατότητα να υποβαθμίσει την αντοχή του πολτού αν δεν ελεγχθεί σωστά. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μεγάλη αύξηση στη χρήση της (Σχήμα 4.22).

Σχήμα 4.22. Παγκόσμια χωρητικότητα παραγωγής πολτού απολιγνινωμένου με οξυγόνο



Πηγή: European Commission, Δεκέμβριος 2001

5.3.3.5 Βελτιωμένη λεύκανση

Αποτελεί την τελική λεύκανση, η οποία αφαιρεί όλη τη λιγνίνη και μειώνει τον αριθμό Κάπα σε μηδέν. Η τελική λεύκανση πάντα εφαρμόζεται σε διάφορα στάδια για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των χρησιμοποιούμενων χημικών ενώσεων, και για τη μείωση της απώλειας αντοχής του πολτού. Υπάρχουν αρκετά χημικά λεύκανσης που χρησιμοποιούνται εμπορικά, όπως το χλώριο, διοξείδιο χλωρίου, υποχλωριώδες νάτριο, οξυγόνο, υπεροξείδιο και όζον. Από αυτά τα χημικά, τα τρία πρώτα περιλαμβάνουν άτομα χλωρίου, ενώ τα τρία τελευταία χρησιμοποιούν μη χλωριούχες οξειδωτικές ενώσεις. Το στοιχειώδες χλώριο (Cl_2) ήταν για πολλά χρόνια το πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέσο της διαδικασίας λεύκανσης. Είναι αποτελεσματικό στην λεύκανση πολτού και (αν χρησιμοποιηθεί σωστά) δεν υποβαθμίζει την αντοχή του. Όμως, παράγει μία μεγάλη ποσότητα χλωριωμένων οργανικών ενώσεων στα απόβλητα, και αρκετές προσπάθειες επομένως γίνονται για τη μείωση της χρήσης του. Για τον ίδιο λόγο η χρήση του υποχλωριώδους νατρίου (που επίσης επηρεάζει την αντοχή του πολτού) ουσιαστικά εξαλείφθηκε.

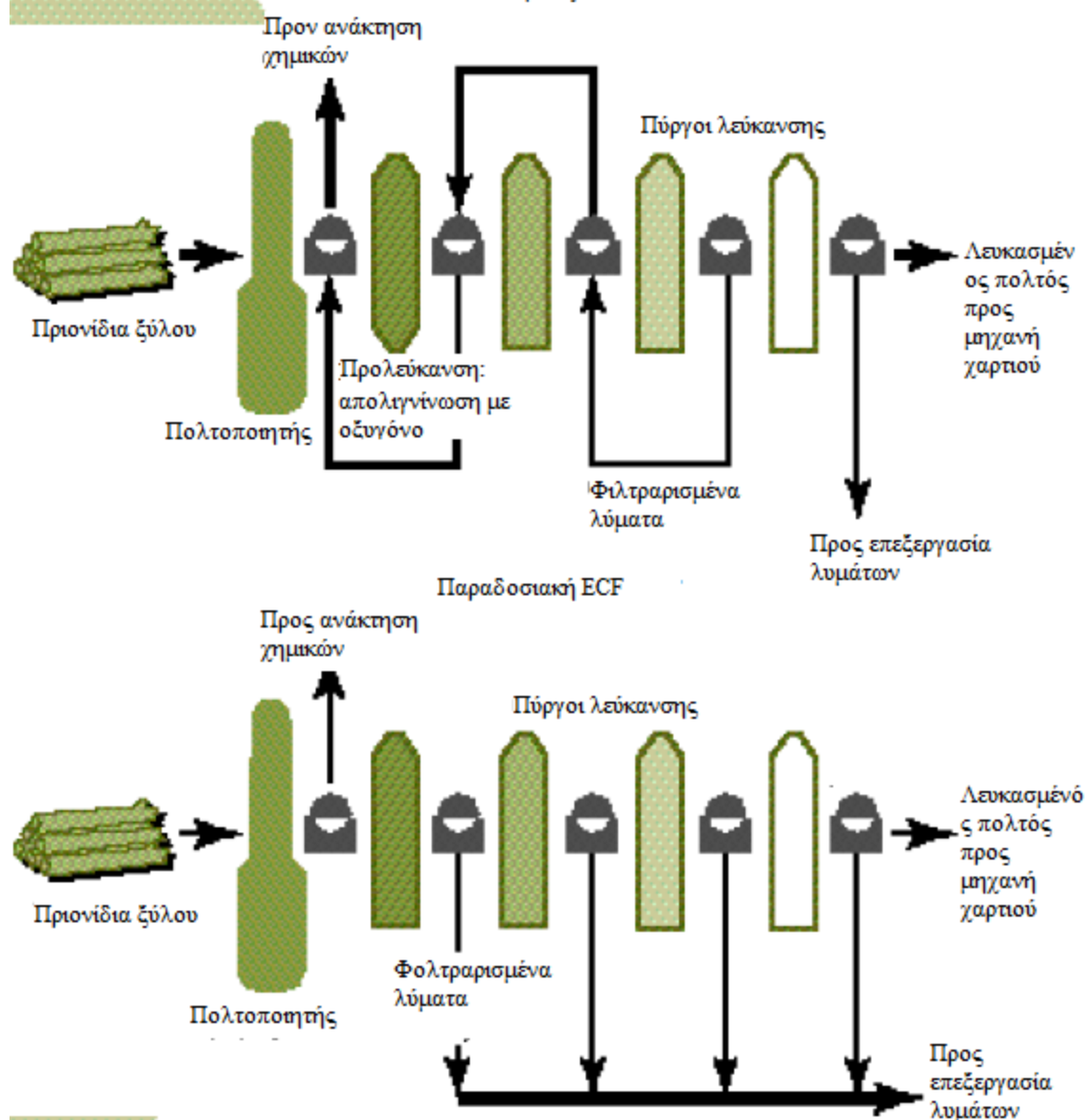
5.3.3.5.1 ECF λεύκανση

Οι σύγχρονοι σταθμοί λεύκανσης δεν χρησιμοποιούν στοιχειώδες χλώριο. Ονομάζονται σταθμοί λεύκανσης ελεύθεροι από στοιχειώδες χλώριο (Elemental Chlorine Free- ECF). Το διοξείδιο χλωρίου, που χρησιμοποιείται αντί του χλωρίου (επιπρόσθετα με μη χλωριούχες ενώσεις), είναι περιβαλλοντικά πιο ευνοϊκό. Όμως, παρόλο που είναι καλό στην διατήρηση αντοχής του πολτού, δεν είναι τόσο αποτελεσματικό όσο το Cl_2 στην απολιγνίνωση / λεύκανση.

Οι περισσότεροι ECF σταθμοί χρησιμοποιούν μία διεργασία λεύκανσης τριών βημάτων με διοξείδιο χλωρίου ακολουθούμενο από ένα μίγμα NaOH , O_2 και υπεροξειδίου και μετά ξανά διοξείδιο χλωρίου. Τα στάδια με το διοξείδιο χλωρίου εφαρμόζονται με pH 3 – 4,5 και του υπεροξειδίου με pH 10 – 11. Η θερμοκρασία διατηρείται στους 70 – 80 °C για αρκετά γρήγορο ρυθμό αντίδρασης.

Η αντικατάσταση των ενώσεων χλωρίου με ενώσεις οξυγόνου μειώνει την διαβρωτικότητα των λυμάτων σε κάθε στάδιο της διεργασίας λεύκανσης. Αυτό επιτρέπει στα φιλτραρισμένα απόβλητα να σταλούν στο σύστημα ανάκτησης χημικών και να ξαναχρησιμοποιηθούν αντί να επεξεργαστούν μόνο και να εκκενωθούν. Ένας τρόπος αντικατάστασης χλωρίου είναι με όζον. Το Σχήμα 4.23 συγκρίνει την διαδρομή των φιλτραρισμένων αποβλήτων στην ECF λεύκανση με όζον και στην παραδοσιακή.

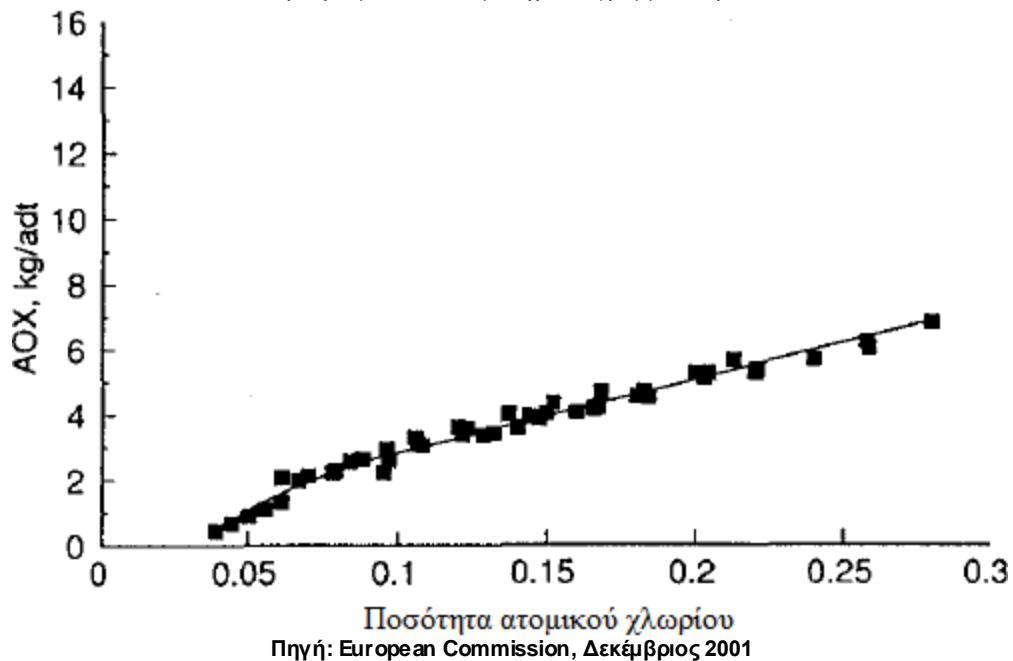
Σχήμα 4.23 Λεύκανση ECF με όζον και παραδοσιακή λεύκανση ECF με όζον



Πηγή: European Commission, Δεκέμβριος 2001

Η ποσότητα των χλωριωμένων τοξικών ενώσεων στα απόβλητα από ένα σωστά λειτουργούμενο ECF σταθμό είναι μικρή (ιδιαίτερα μετά από δευτερογενή επεξεργασία) και τα αποτελέσματα στο περιβάλλον είναι ασήμαντα. Η μείωση χρήσης του χλωρίου οδηγεί σε μία γραμμική μείωση των παραγόμενων AOX, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.24.

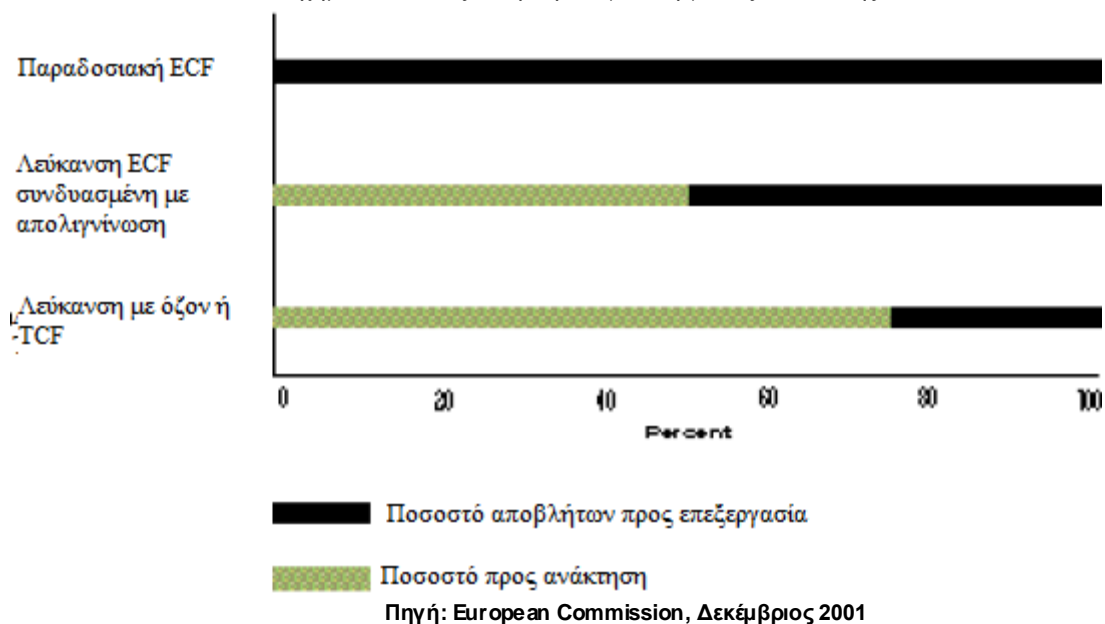
Σχήμα 4.24. Καθώς μειώνεται η χρήση του ατομικού χλωρίου στη λεύκανση, οι συγκεντρώσεις των ΑΟΧ στα απόβλητα μειώνονται με σχεδόν γραμμικό τρόπο.



5.3.3.5.2 TCF λεύκανση

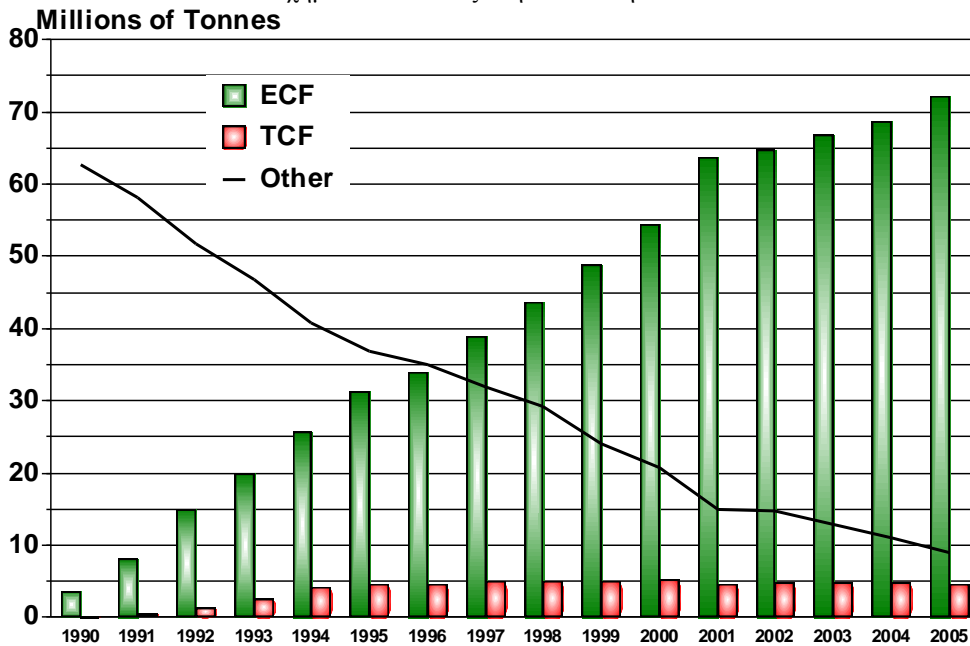
Όμως, ειδικά στην Ευρώπη, υπάρχει μία τεχνική λεύκανσης που πηγαίνει ένα βήμα πιο πέρα από τη λεύκανση με όζον, και ονομάζεται λεύκανση παντελώς ελεύθερη από χλώριο (Total Chlorine Free - TCF). Σε αυτήν, μόνο οξυγόνο, υπεροξείδιο και όζον (επιπρόσθετα με καυστικές και χηλικές ενώσεις) χρησιμοποιούνται. Ο TCF πολτός φτάνει στην ίδια ευκρίνεια με τον ECF, αλλά η αντοχή του είναι λίγο μικρότερη. Τέτοιοι σταθμοί απαιτούν απολιγνίνωση με οξυγόνο και επίσης αποστείρωση σε χαμηλότερο βαθμό Κάπα. Το κόστος χημικών ενώσεων είναι επίσης υψηλότερο. Στο Σχήμα 4.25, παρουσιάζεται ένα σχηματικό διάγραμμα των ροών των απόβλητων των τριών μεθόδων λεύκανσης.

Σχήμα 4.25. Ροές απόβλητων για διεργασίες λεύκανσης πολτού



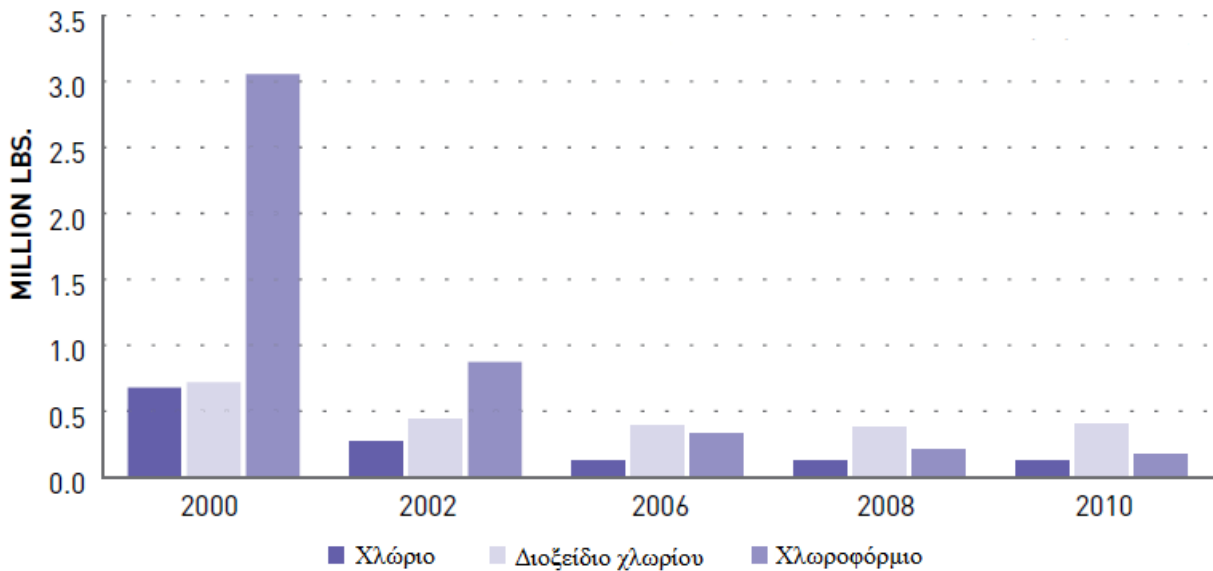
Στο Σχήμα 4.26 εμφανίζονται οι τάσεις όσον αφορά τις μεθόδους λεύκανσης με το πέρασμα των χρόνων, ενώ στο Σχήμα 4.27 η μείωση εκπομπών χλωρωμένων ενώσεων.

Σχήμα 4.26. Τάσεις στη λεύκανση πολτού



Πηγή: European Commission, Δεκέμβριος 2001

Σχήμα 4.27. Εκπομπές χλωρωμένων ενώσεων



Πηγή: 2012 AF&PA, Sustainability Report

5.3.3.6 Βιομηχανική βιοτεχνολογία

Οι εταιρείες βιομηχανικής βιοτεχνολογίας έχουν ερευνήσει νέους τρόπους να βελτιώσουν κάποιες διεργασίες στην παραγωγή χαρτιού μέσω χρήσης ενζύμου. Ένζυμα που χρησιμοποιούνται στη λεύκανση επιτρέπουν στη θερμοκρασία της διεργασίας να μειωθεί και επίσης, να ελαττώσει την ανάγκη έκπλυσης. Αυτές οι αλλαγές σημαντικά μειώνουν την ποσότητα του χρησιμοποιούμενου χλωρίου και

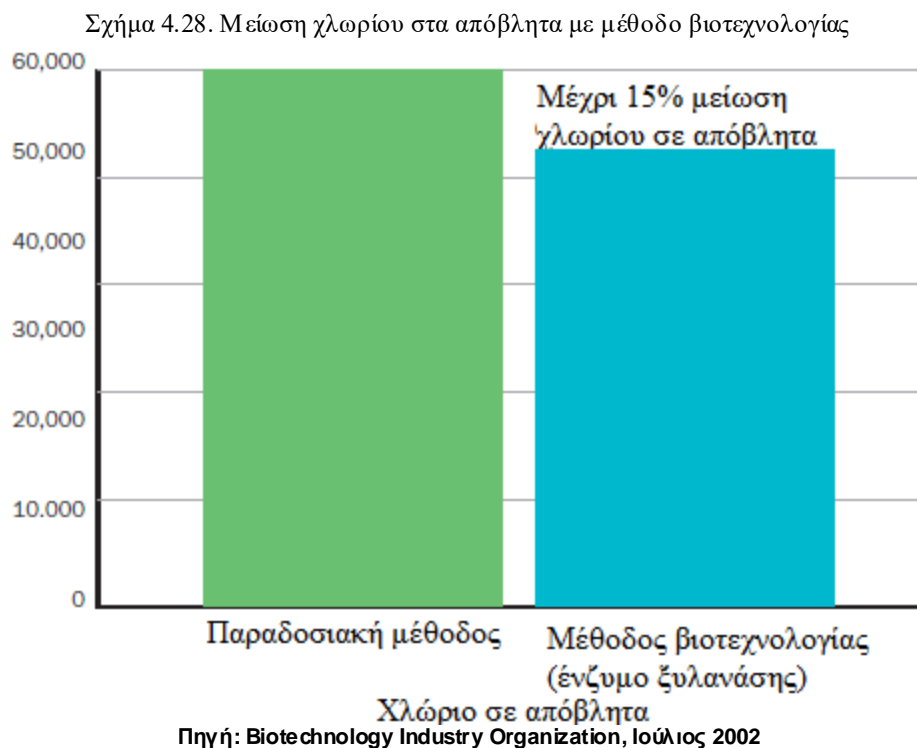
ενέργειας, με αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους παραγωγής, των εκπομπών τοξικών υπολειμμάτων χλωρίου (όπως διοξίνες) και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα από την παραγωγή ενέργειας. Άλλη διεργασία βιοτεχνολογίας μπορεί να αυξήσει την παραγωγή πολτού κατά 30% από την ίδια ποσότητα ξύλου, με αποτέλεσμα την περεταίρω μείωση ζήτησης ενέργειας και εκπομπών.

Η βιοτεχνολογία προχωρά πιο πέρα από τη μείωση ρύπανσης που συνδέεται με την παραγωγή χαρτιού. Ένα ένζυμο βιοτεχνολογίας μπορεί να επιταχύνει την παραγωγή χαρτιού κατά 5%. Άλλα ένζυμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν να βελτιώσουν τη διεργασία απομελάνωσης σε ίνες ανακυκλωμένου χαρτιού.

Υπάρχουν δύο εναλλακτικές διεργασίες που χρησιμοποιούν ένζυμα βιοτεχνολογίας για τη βελτίωση της λεύκανσης παράλληλα με τη μείωση χρήσης προϊόντων χλωρίου.

5.3.3.6.1 Ένζυμο ξυλανάσης

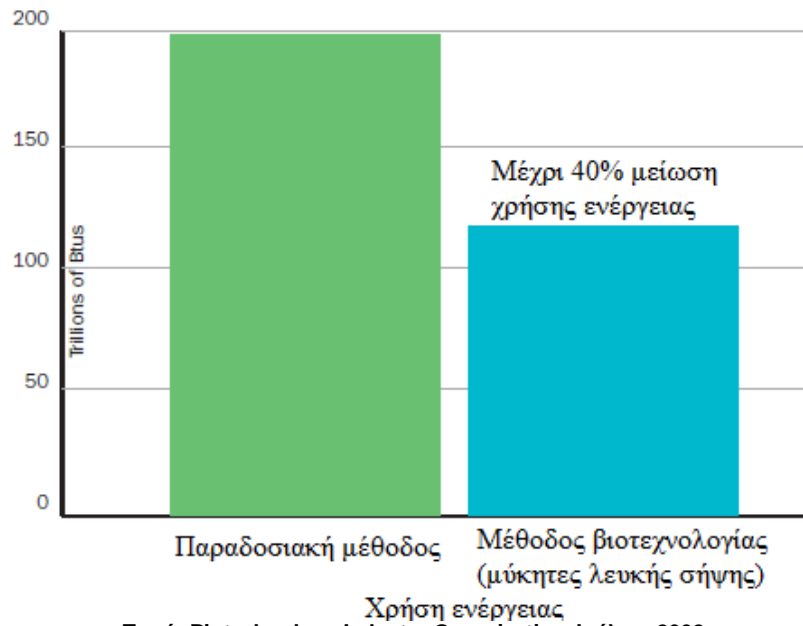
Η πρώτη χρησιμοποιεί ένα ένζυμο που ονομάζεται ξυλανάση εφαρμόζεται πριν τη λεύκανση, αντικαθιστώντας τις ενώσεις χλωρίου στο πρώτο στάδιο της ECF λεύκανσης που αποτελείται από πέντε στάδια. Οι αλλαγές αυτές στην παραγωγή και λεύκανση του πολτού μειώνουν την ποσότητα των χημικών χλωρίου που απαιτούνται για λεύκανση 10 – 15% (Σχήμα 4.28).



5.3.3.6.2 Μύκητες λευκής σήψης

Η δεύτερη εναλλακτική διεργασία χρησιμοποιεί μύκητες λευκής σήψης που εφαρμόζονται ως στάδιο προ – επεξεργασίας για να διασπάσουν τη λιγνίνη στην κυτταρική δομή τοιχωμάτων στο ξύλο. Τα πριονίδια ξύλου εγχέονται με τους μύκητες και ένα μέσο ανάπτυξης, παραμένοντας για 2 εβδομάδες, και μετά επεξεργάζονται χρησιμοποιώντας την παραδοσιακή χημική ή μηχανική διεργασία. Αφού τα τοιχώματα των κυττάρων διασπώνται με αυτό το στάδιο, χρειάζονται λιγότερες πηγές για τη λεύκανση του πολτού. Οι διεργασίες βιοτεχνολογίας μειώνουν τη χρήση ενέργειας που συνδέεται με τη λεύκανση κατά 40% - ένα ποσοστό που έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει επιπρόσθετη μείωση ρύπανσης (Σχήμα 4.29).

Σχήμα 4.29. Μείωση κατανάλωση ενέργειας στη παραγωγή πολτού με μία διεργασία βιοτεχνολογίας



6 Τεχνικές επεξεργασίας αποβλήτων

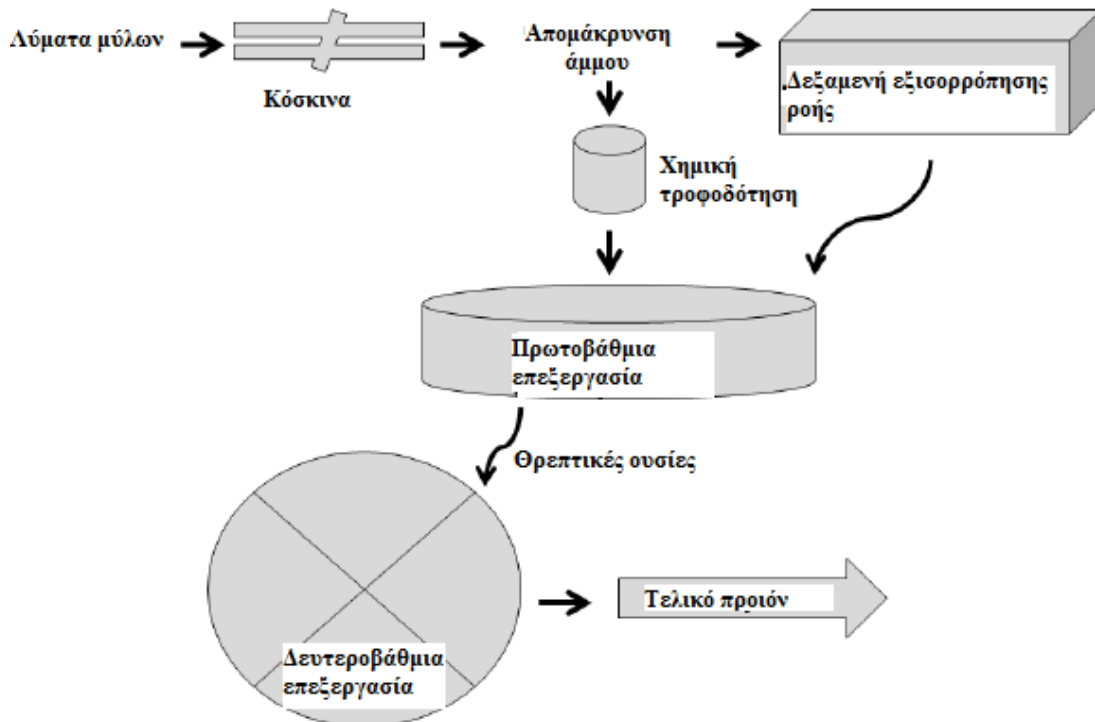
6.1 Εισαγωγή

Υπάρχουν χιλιάδες σταθμοί χάρτου που λειτουργούν παγκοσμίως που παράγουν περισσότερο από 450 εκατομμύρια τόνους χάρου. Και αναμένεται ότι η ζήτηση χάρτου θα φτάσει στα 500 εκατομμύρια τόνους ανά χρόνο μέχρι το 2020. Αυτή η γρήγορη βιομηχανοποίηση έχει αντίστροφο αντίκτυπο στο συνολικό περιβάλλον. Ο σταθμός χάρτου θεωρείται σαν μία από τις πιο σημαντικές μονάδες όσον αφορά τη χρήση φρέσκου νερού και επίσης την παραγωγή υψηλά τοξικών αποβλήτων, σύμφωνα με τις συγκεντρώσεις σε COD, BOD, AOX και στα ολικά αιωρούμενα στερεά. Το περιεχόμενο των AOX στα απόβλητα είναι υψηλά ανθεκτικό, βιοσυσσωρεύσιμο και καρκινογόνο. Η διοξίνη, που είναι η πιο τοξική ουσία, επίσης ανήκει στην οικογένεια αυτών των ουσιών, και έχει αναφερθεί ως παρούσα στα απόβλητα χαρτοβιομηχανίας.

6.2 Στάδια επεξεργασίας αποβλήτων

Το Σχήμα 5.1 δείχνει μια τυπική επεξεργασία αποβλήτων που αποτελείται από τμήματα φιλτραρίσματος, δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης και μονάδα βιολογικής επεξεργασίας. Επίσης, η ρύπανση των υδάτων μπορεί να μειωθεί υιοθετώντας κάποια φιλικά περιβαλλοντικά μέτρα, όπως αντικατάσταση των χλωριωμένων ενώσεων που χρησιμοποιούνται κατά τη λεύκανση με ρίζες ελεύθερες από χλώριο. Αλλά αυτή η αλλαγή μειώνει τη συγκέντρωση των COD / BOD μόνο μέχρι κάποιο όριο. (Ali Arshad, 2013)

Σχήμα 5.1. Τυπικό διάγραμμα επεξεργασίας αποβλήτων σταθμών χάρτου



Πηγή: Ali Arshad, 2013

Η βιολογική επεξεργασία συνήθως αποτελείται από διεργασία ενεργούς ιλύος ή αναερόβια αποσύνθεση ή μερικές φορές από το συνδυασμό και των δύο. Ο Πίνακας 5.1 δείχνει τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων του σταθμού χάρτου.

Πίνακας 5.1. Χαρακτηριστικά αποβλήτων σταθμού χάρτου

Παράμετροι	Συγκέντρωση	Παράμετροι	Συγκέντρωση
pH	8.4	COD (mg/L)	1810
Χρώμα (μονάδες)	1736	TSS (mg/L)	958
Λιγνίνη (mg/L)	452	TDS (mg/L)	1524
AOX (mg/L)	32	BOD (mg/L)	960

6.2.1 Προεπεξεργασία

Αυτό είναι το πρώτο στάδιο στις περισσότερες μονάδες επεξεργασίας αποβλήτων όπου αφαιρούνται χοντροκομμένα στερεά σωματίδια και μεγάλου όγκου ύλη. Οι κύριες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε αυτό το στάδιο είναι ουδετεροποίηση, φιλτράρισμα, επίπλευση, μεμβράνες, προσρόφηση κτλ. Για παράδειγμα, με επίπλευση αέρα, 95% των αιωρούμενων στερεών απαλείφονται από τα απόβλητα.

Επίσης, υπάρχουν κάποιες προηγμένες τεχνικές προεπεξεργασίας οι οποίες προηγούνται της αναερόβιας αποσύνθεσης, και αφορούν κυρίως την επεξεργασία ιλύος και την κυτταρική διάσπαση. Η τελευταία παρεμποδίζει τις οργανικές ουσίες για τη διαμόρφωση ιλύος. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω διαταραχών στα κυτταρικά τοιχώματα των μικροοργανισμών.

6.2.1.1 Υπέρηχοι

Η διάσπαση ιλύος επιτυγχάνεται με την έκθεσή της σε υψηλής συχνότητας κύματα ήχου που παράγονται από μία δονούμενη ακίδα. Η θραύση των κυτταρικών τοιχωμάτων συμβαίνει όταν η πίεση στην υγρή φάση μειώνεται κάτω από την πίεση εξάτμισης, με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση φυσαλίδων. Η γρήγορη επέκταση των μικροφυσαλίδων προκαλεί τοπικά υψηλή θερμοκρασία και υψηλή πίεση στην υγρή φάση, που σπάνε την κυτταρική μεμβράνη, ελευθερώνοντας διακυτταρική ύλη. Έτσι, η υπερήχηση παράγει μηχανικές δυνάμεις διάτμησης μέσω σπηλαίωσης. Υψηλής έντασης υπερηχητικές συσκευές που παράγουν 20 και 40 kHz συνήθως χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αυτών των κυμάτων υψηλής συχνότητας. Ο Khanal (2006) έδειξε ότι η περιεκτικότητα στερεών στην ιλύ και η ενέργεια εισόδου επηρεάζει την υπερηχητική διάσπαση, και αυτή η διάσπαση είναι πιο αποτελεσματική σε μεγαλύτερη περιεκτικότητα στερεών.

6.2.1.2 Θερμική επεξεργασία

Η έκθεση ιλύος σε υψηλές θερμοκρασίες και υψηλές πιέσεις είναι μία αποτελεσματική μέθοδος για την επίτευξη κυτταρικής διάσπασης μειώνοντας τον απαιτούμενο χρόνο για υδρόλυση. Οι περισσότερες έρευνες που περιλαμβάνουν θερμική επεξεργασία χρησιμοποιούν θερμοκρασίες 150 – 200 °C.

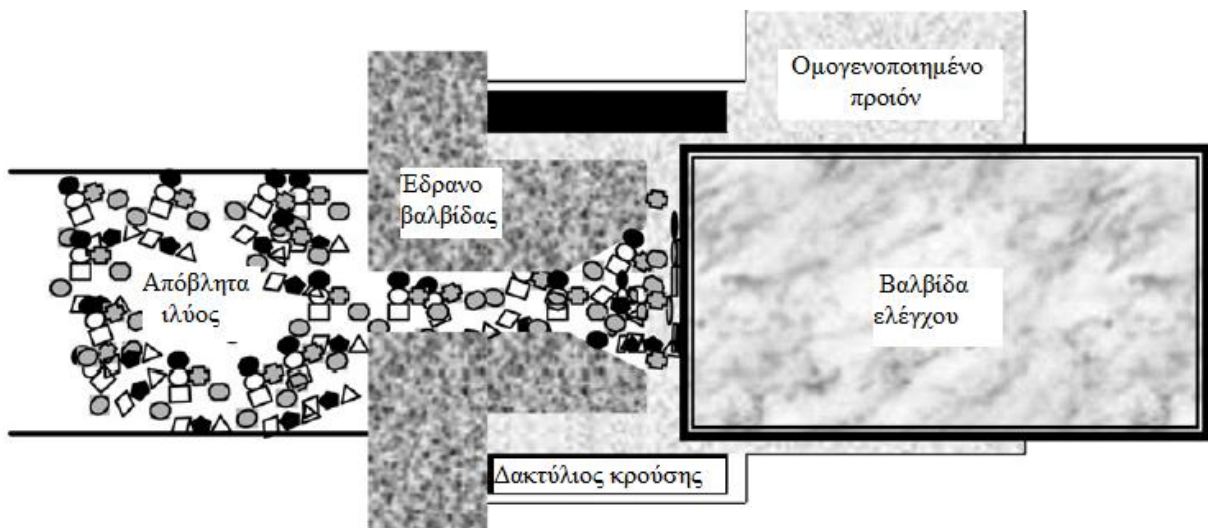
6.2.1.3 Οξείδωση με όζον

Η υδρόλυση της ιλύος επιτυγχάνεται εκθέτοντάς την σε υψηλές οξειδωτικές συνθήκες (όζον) που διασπά τα κυτταρικά τοιχώματα ελευθερώνοντας ευδιάλυτο COD. Το όζον αντιδρά με πολυσακχαρίτες, πρωτεΐνες και λιπίδια (που είναι συστατικά των κυτταρικών μεμβρανών) μετατρέποντάς τα σε ενώσεις μικρότερου μοριακού βάρους. Έτσι, η κυτταρική μεμβράνη διασπάται, χύνοντας το κυτταρόπλασμα.

6.2.1.4 Μηχανική διάσπαση με σπηλαίωση

Το σχέδιο του ομογενοποιητή υψηλής πίεσης αναπαρίσταται σχηματικά στο Σχήμα 5.2. Η ιλύς αντλείται υπό υψηλή πίεση και χαμηλή ταχύτητα στον ομογενοποιητή. Καθώς η ιλύς πλησιάζει το δακτύλιο κρούσης, υπάρχει μία γρήγορη αύξηση στην ταχύτητα με μείωση στην πίεση. Έτσι, προκύπτει έντονη απελευθέρωση ενέργειας που προκαλεί σοβαρή αναταραχή και τοπικές διαφορές πίεσης, που επίσης οδηγούν στη διαμόρφωση φυσαλίδων σπηλαίωσης. Όλες αυτές οι δυνάμεις διασπούν τα κυτταρικά τοιχώματα, απελευθερώνοντας κυτταρόπλασμα. (Allan Elliot, 2007)

Σχήμα 5.2. Εγκάρσια τομή ομογενοποιητή υψηλής πίεσης



Πηγή: Allan Elliot, 2007

6.2.1.5 Μηχανική επεξεργασία

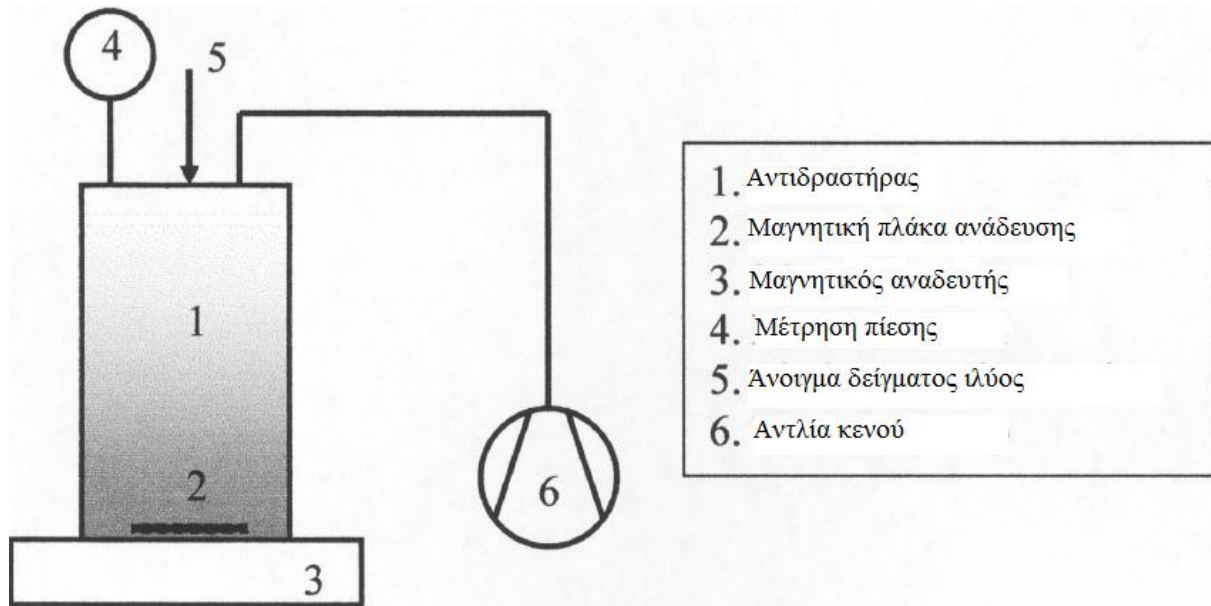
Η υδρόλυση κυτταρικών μεμβρανών επίσης επιτυγχάνεται με τεχνικές μηχανικής διάσπασης. Μία μέθοδος που χρησιμοποιεί δύο πλάκες που περιστρέφονται αντίθετα χρησιμοποιείται ως προεπεξεργασία ιλύος στους αναερόβιους χωνευτές. Μία δεύτερη μέθοδος περιλαμβάνει άλεση, αλλά δεν επηρεάζει πάντα την ιλύ.

6.2.1.6 Εφαρμογή κενού

Η χρήση κενού στη διάσπαση κυττάρου είναι μία τεχνική που ακόμα μελετάται και συμβαίνει στην πρώτη φάση της συνολικής διεργασίας. Η ιλύς εισέρχεται σε αντιδραστήρα κενού, που αποτελείται από κύλινδρο Plexiglas (Σχήμα 5.3). Τα δύο ανοίγματα στην κορυφή του αντιδραστήρα συνδέονται σε αντλία κενού και όργανο μέτρησης πίεσης. Ο αντιδραστήρας τοποθετείται πάνω σε ένα

μαγνητικό αναδευτή πλάκας για να επιτευχθεί αρκετή ανάδευση κατά τη διεργασία εν κενώ. (Abbassi E. Bassi, 2003)

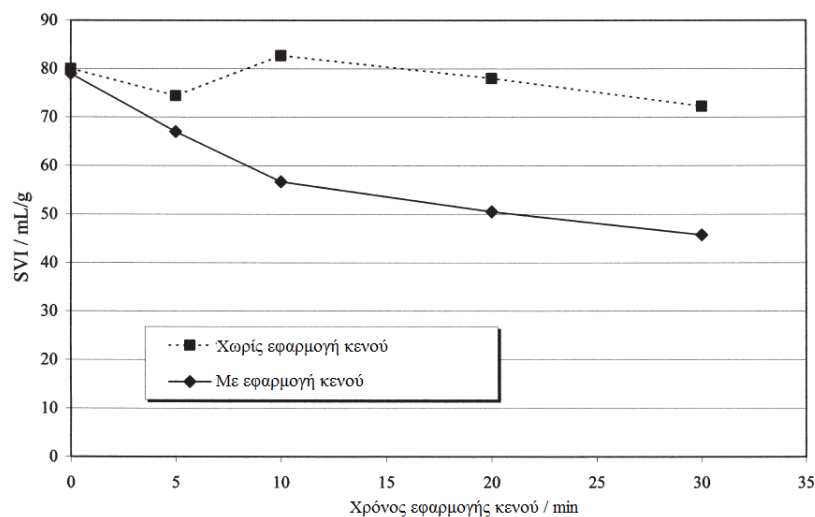
Σχήμα 5.3. Σχηματικό διάγραμμα αντιδραστήρα κενού



Πηγή: Abbassi E. Bassi, 2003

Για να εξεταστεί πως η κυτταρική διάσπαση επηρεάζει την καθίζηση της ύλης, παρουσιάζεται το Σχήμα 5.4, όπου η διεργασία εν κενώ έχει εμφανή επιρροή στην καθίζηση ύλης. Αυτό βελτιώνει την αποτελεσματικότητα της διεργασίας επεξεργασίας.

Σχήμα 5.4. Επιρροή κυτταρικής διάσπασης στα χαρακτηριστικά καθίζησης της ύλης



Πηγή: Abbassi E. Bassi, 2003

6.2.2 Πρωτοβάθμια - φυσική επεξεργασία

Οι φυσικοχημικές διεργασίες χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση αιωρούμενων στερεών, κολλοειδών σωματιδίων, τοξικών ενώσεων, επιπλέουσας ύλης και χρωμάτων από τα απόβλητα. Αυτές

οι διεργασίες συνήθως χρησιμοποιούνται στα προκαταρκτικά ή πρωτοβάθμια στάδια επεξεργασίας σε διαφορετικές μορφές, όπως καθίζηση ή επίπλευση.

Η συγκέντρωση των ρύπων και η επιθυμητή αποτελεσματικότητα αφαίρεσής τους είναι σημαντικοί παράγοντες στην επιλογή του τύπου των φυσικοχημικών διεργασιών που θα χρησιμοποιηθεί. Οι διεργασίες αυτές είναι ικανές για υψηλή αποτελεσματικότητα αφαίρεσης αιωρούμενων σωματιδίων ενώ η απομάκρυνση COD και BOD που είναι οι κύριοι ρύποι, δεν είναι ικανοποιητική. Επομένως, αυτές οι διεργασίες πρέπει να συνδυαστούν με βιολογικές για να επιτύχουν αποδεκτά επίπεδα ρύπων.

Η δεξαμενή καθίζησης αφαιρεί πάνω από 80% αιωρούμενων στερεών, αλλά είναι λιγότερο αποτελεσματική στην μείωση BOD και COD. Αφού τα αιωρούμενα σωματίδια στα απόβλητα κυρίως αποτελούνται από σωματίδια φλοιού, ίνες, υλικά ενίσχυσης και επικάλυψης κτλ, προτείνεται σύστημα επίπλευσης με αέρα, σαν μονάδα προεπεξεργασίας για τη βιολογική επεξεργασία. Η απόδοση του παρατηρείται στο 90% αφαίρεσης αιωρούμενων στερεών και 90% μείωση COD. Παρόμοια, χρησιμοποιώντας υψικάμινο, 60% λιγνίνη αφαιρείται από τα απόβλητα.

6.2.3 Δευτεροβάθμια - βιολογική επεξεργασία

Στη βιολογική επεξεργασία, οι οργανικοί ρύποι και οι νιτροδεις ενώσεις αφαιρούνται μέσω αερόβιας ή αναερόβιας αποσύνθεσης με μικροοργανισμούς (βιοαποδόμηση). Η βιοαποδόμηση είναι η βιολογική μετατροπή των οργανικών ρύπων (που λειτουργούν ως πηγή ενέργειας και άνθρακα στους οργανισμούς) σε λιγότερο επιβλαβείς ενώσεις όπως διοξείδιο του άνθρακα και νερό.

Η βιολογική επεξεργασία συνήθως χρησιμοποιείται για τη μείωση των συγκεντρώσεων BOD, αιωρούμενων στερεών και θρεπτικών ουσιών. Οι περισσότεροι σταθμοί επεξεργασίας αποβλήτων χρησιμοποιούν αερόβια και / ή αναερόβια βιολογικές διεργασίες για την αφαίρεση οργανικών ρύπων.

Οι περισσότερες μονάδες βιολογικής επεξεργασίας είναι διεργασίες ενεργούς ιλύος. Τα προβλήματα της κακής καθίζησης της λάσπης προκαλούνται κυρίως εξαιτίας της κακής τροφοδοσίας με οξυγόνο ή από ανεπάρκεια θρεπτικών συστατικών, αλλά λύνονται με την πρόσθεση συγκεκριμένων χημικών, όπως χλωρίου, σιδηρούχων αλάτων ασβεστόλιθου κτλ.

Η αποτελεσματικότητα μείωσης του COD της ενεργούς ιλύος μπορεί να βελτιωθεί σε 80%, αν υψηλού ρυθμού βιολογικό φίλτρο ή οξονισμός εισαχθούν. Επιπλέον, η αφαίρεση τοξικότητας είναι χαμηλή.

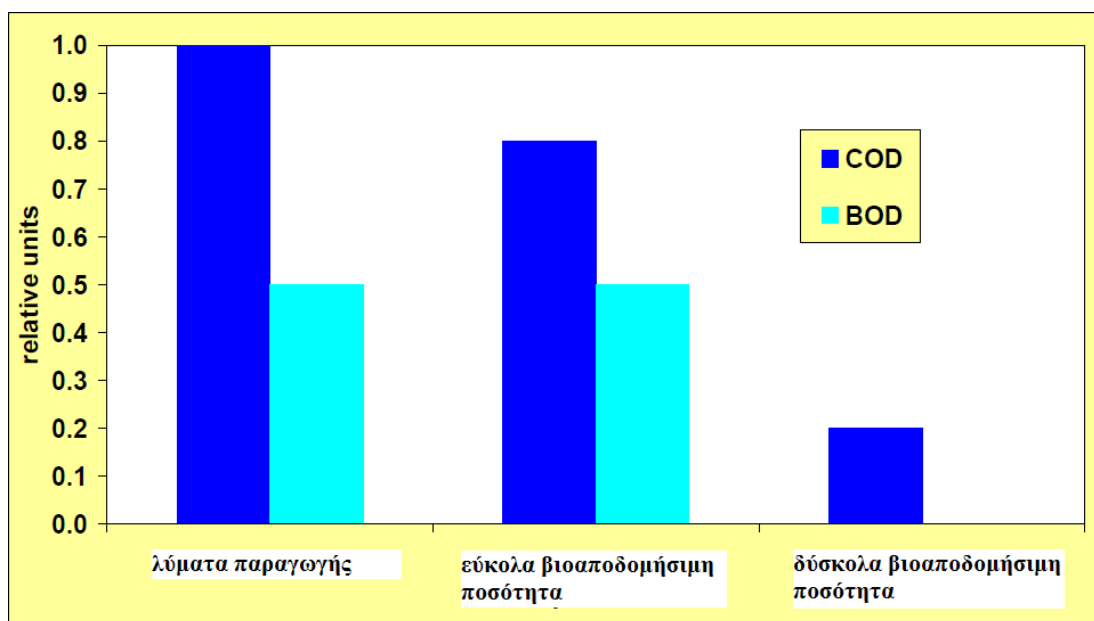
Οι άλλοι ρύποι αερόβιας διεργασίας, όπως δεξαμενές αερισμού, μειώνουν 80% της συγκέντρωσης COD και 70% τις AOX.

Η τάση χρήσης αναερόβιας διεργασίας έχει αρχίσει από το 1970. Έχει σαν είσοδο χαμηλή ενέργεια, απαιτούνται λιγότερα θρεπτικά συστατικά και παράγεται μικρότερη ποσότητα ιλύος. Οι δύο σταδίων διεργασίες, αναερόβια – αερόβια, είναι σχετικά πιο αποτελεσματικές στην αφαίρεση COD και θείου. Αναερόβιο φίλτρο, αντιδραστήρες ανοδικής ροής στρώματος ιλύος, ρευστοποιημένης κλίνης, αναερόβιας δεξαμενής είναι οι κύριες διαθέσιμες διεργασίες αναερόβιας επεξεργασίας. Περίπου 55% αφαίρεση λιγνίνης αναφέρεται χρησιμοποιώντας αναερόβια διεργασία.

Οι αερόβιας διεργασίες λειτουργούν εύκολα, αλλά τα θρεπτικά συστατικά και οι απαιτήσεις ενέργειας είναι συγκριτικά περισσότερες, και αυτό τις κάνει ακριβές. Ενώ από την άλλη, οι αναερόβιας διεργασίες που έχουν λιγότερες απαιτήσεις εισόδου, και είναι εύκολες στο χειρισμό, φαίνονται να είναι πιο εφικτές για την επεξεργασία αποβλήτων σταθμού χάρτου.

Στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται η επιρροή της βιολογικής επεξεργασίας στις συγκεντρώσεις BOD και COD. (Mobius Christian H., 2006)

Σχήμα 5.5. Παραδειγματική παρουσίαση της μείωσης των BOD και COD μετά τη βιολογική επεξεργασία λυμάτων μύλου χαρτιού



Πηγή: Mobius Christian H., 2006

6.2.4 Τριτοβάθμια - φυσικοχημική επεξεργασία

Αυτό το στάδιο επεξεργασίας συνήθως χρησιμοποιείται για μείωση χρώματος, τοξικότητας ή αιωρούμενων στερεών στα υγρά απόβλητα.

Γενικά, ο συνδυασμός διαφόρων μονάδων επεξεργασίας προσπαθεί να επιτύχει τη μέγιστη απόδοση. Για παράδειγμα, ο συνδυασμός κροκίδωσης και υγρής οξείδωσης αφαιρεί 50% COD και 75% λιγνίνη. Ο συνδυασμός χημικής οξείδωσης και όζοντος ή ενεργούς ιλύος αφαιρεί 80% COD. Ένας αερόβιος – αναερόβιος αντιδραστήρας μειώνει κατά 60% το COD. Ο συνδυασμός δεξαμενής πρωτοβάθμιας καθίζησης και δεξαμενής αερισμού μειώνει 80% το COD.

Οι πιο κοινά εφαρμοζόμενες μονάδες τριτοβάθμιας επεξεργασίας είναι η υπερδιήθηση, ο οζονισμός, η προσρόφηση και η τεχνολογία μεμβρανών.

Η υπερδιήθηση σε συνδυασμό με την επίπλευση με αέρα είναι επίσης αποτελεσματική, αφαιρώντας 70% συνολικού οργανικού άνθρακα και χρώμα. Αυτή η διεργασία είναι επίσης αποτελεσματική για την απομάκρυνση βαρέων μετάλλων. Με την αντίστροφη όσμωση, 80% μπορεί να μειωθεί. Η χρήση οζονισμού επίσης μειώνει τη συγκέντρωση του COD και την τοξικότητα, όπως και 85% του χρώματος. Η χρήση υγρής οξείδωσης, σε συνδυασμό με όζον, ή η προηγμένη φωτοκατάλυση με O_2 / TiO_2 / UV μειώνει τους ρύπους.

Οι φυσικοχημικές επεξεργασίες είναι αξιόπιστες όσον αφορά την απόδοση, αλλά είναι πολύ ακριβές.

6.3 Τεχνικές επεξεργασίας στερεών αποβλήτων

Υπάρχουν αρκετές τεχνολογίες ελέγχου που αφορούν την αντιμετώπιση συγκεκριμένων ουσιών από τις αέριες εκπομπές των σταθμών πολτού και χάρτου. Ο Πίνακας 5.2 δίνει πιθανές τεχνικές ελέγχου ρύπανσης του αέρα για κάθε παράμετρο αέριας εκπομπής. Για επαρκή έλεγχο κάποιας συγκεκριμένης πηγής εκπομπών κάποιες φορές ένας συνδυασμός δύο ή περισσότερων τεχνικών ελέγχου είναι απαραίτητος.

Πίνακας 5.2. Τεχνικές ελέγχου για συγκεκριμένες παραμέτρους αέριων εκπομπών

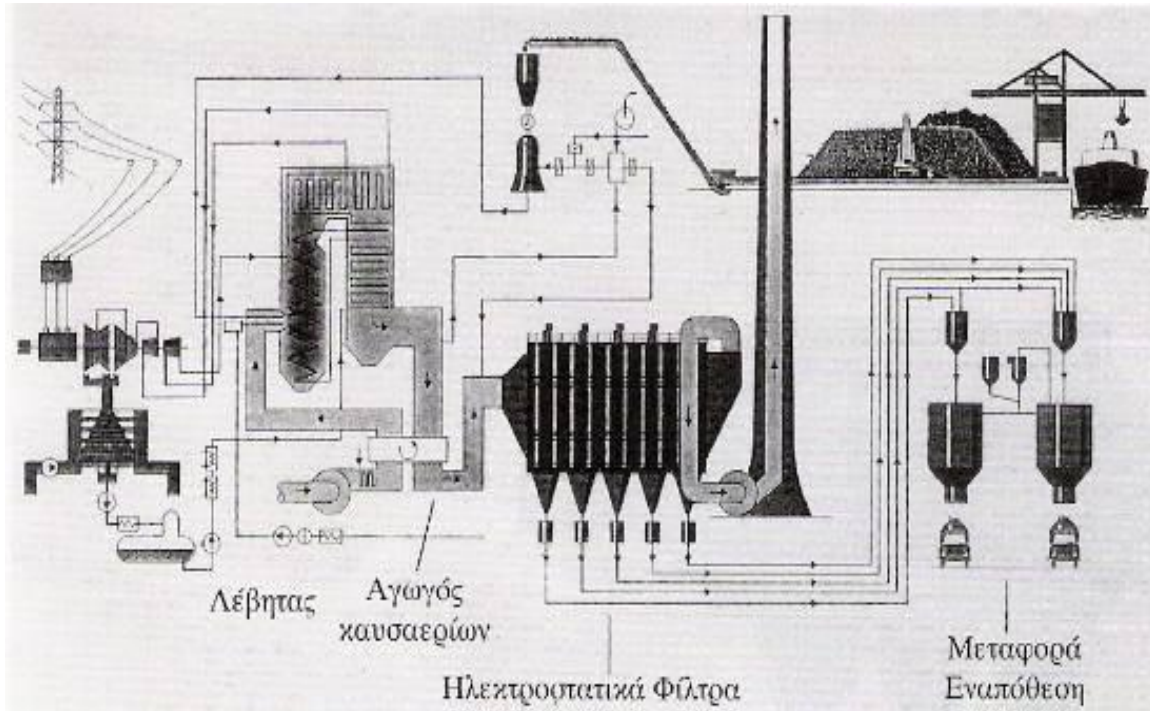
ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ	TRS	SO ₂	NO ₂	σωματίδια	ενώσεις χλωρίου	πτητικές οργανικές ενώσεις
Τεχνικές ελέγχου						
Πλυντρίδες(υγρού ή ξηρού τύπου)	x	x	x	x	x	x
Ηλεκτροστατικός διαχωριστής				x		
Κυκλώνας				x		
Σακκόφιλτρα				x		
Συμπύκνωση	x					
Αποτέφρωση	x					x
Χλωρίωση	x					
Προσρόφηση, ενεργός άνθρακας						x

6.3.1 Τεχνικές αντιμετώπισης τέφρας και σκόνης

6.3.1.1 Ηλεκτροστατικός διαχωριστής

Οι ηλεκτροστατικοί διαχωριστές ή συλλέκτες φυσικά απομακρύνουν σωματίδια. Τα ηλεκτροστατικά φίλτρα (Η/Φ) είναι συσκευές καθαρισμού βιομηχανικών αερίων από αιωρούμενα σωματίδια. Είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά καθώς μπορούν να απομακρύνουν μέχρι και περισσότερο από το 99% των σωματιδίων από τα αερία. Τα Η/Φ χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ιπτάμενη τέφρα), τοποθετούνται, για παράδειγμα, στην έξοδο του λέβητα στερεών καυσίμων και συνήθως μετά τον προθερμαντήρα του αέρα καύσης στη χαρτοβιομηχανία (Σχήμα 5.6). (Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013)

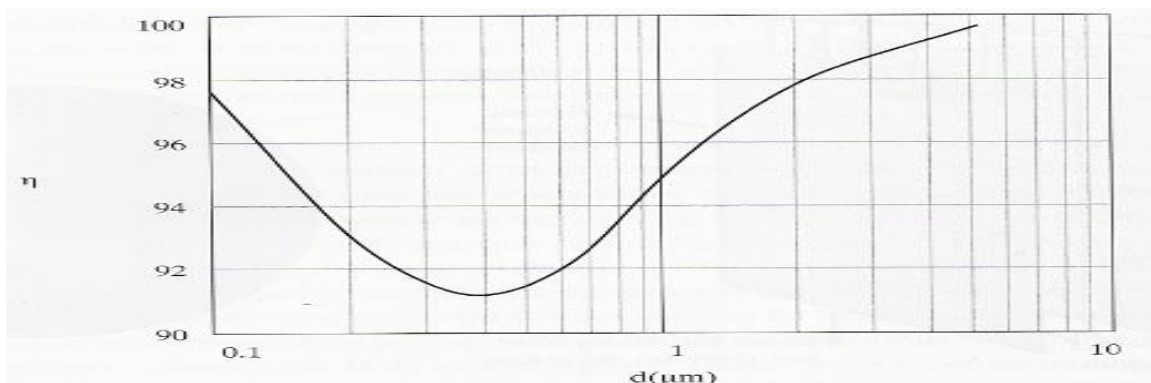
Σχήμα 5.6. Γενική μορφή και θέση εγκατάστασης Η / Φ



Πηγή: Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013

Ο ηλεκτροστατικός συλλέκτης είναι μία διάταξη συλλογής σωματιδίων αυξημένων απαιτήσεων. Με αυτόν επιτυγχάνεται η απομάκρυνση αρκετά μικρών σωματιδίων (γύρω στα 0.5 μm). Επί πλέον η πτώση πίεσης μέσα από ένα ηλεκτροστατικό συλλέκτη είναι της τάξεως των 0.2 kPa ενώ σε άλλους τύπους συλλεκτών η αντίστοιχη πτώση πίεσης είναι π.χ. περίπου 2.5 kPa στους υγρούς συλλέκτες, ενώ στα σακόφιλτρα είναι περίπου 25 kPa. Αυτά κυρίως τα πλεονεκτήματα κάνουν τον ηλεκτροστατικό συλλέκτη να είναι μια πολύ ελκυστική διάταξη σε διάφορες εφαρμογές όπου για μεγάλες παροχές αερίων απαιτείται η απομάκρυνση αρκετά μικρών σωματιδίων (Σχήμα 5.7). (Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013)

Σχήμα 5.7. Βαθμός απόδοσης Η / Φ συναρτήσει της διαμέτρου των σωματιδίων

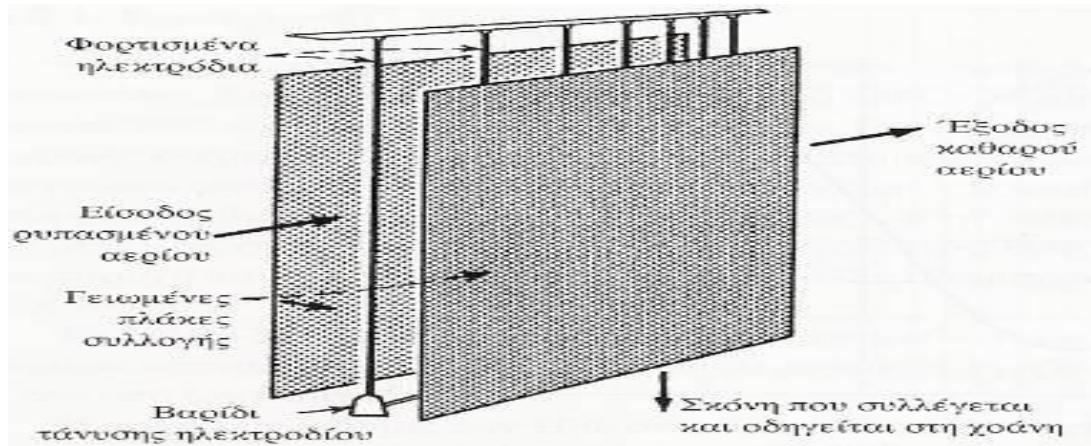


Πηγή: Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013

Η αρχή λειτουργίας των Η/Φ στηρίζεται στη δημιουργία, από δύο ηλεκτρόδια με μεγάλη διαφορά δυναμικού, ενός ισχυρού ηλεκτροστατικού πεδίου διά του οποίου διέρχεται με μικρή ταχύτητα το προς καθαρισμό αέριο ρεύμα. Τα στερεά σωματίδια που εμπεριέχονται στο αέριο φορτίζονται

ηλεκτρικά και έλκονται από τα αντίθετα με αυτά φορτισμένα ηλεκτρόδια-πλάκες συλλογής, όπου προσκολλώνται προσωρινά. Με περιοδικά κτυπήματα, δονήσεις ή με έκπλυση των πλακών συλλογής, τα σωματίδια αποσπώνται και συλλέγονται σε χοάνες συγκέντρωσης στο κάτω μέρος της διάταξης. Από τις χοάνες συλλογής η μάζα των σωματιδίων απομακρύνεται με διάφορους μηχανικούς ή υδραυλικούς τρόπους για περαιτέρω επεξεργασία ή τελική απόθεση (Σχήμα 5.8). (Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013)

Σχήμα 5.8. Γειωμένη επίπεδη πλάκα συλλογής



Πηγή: Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013

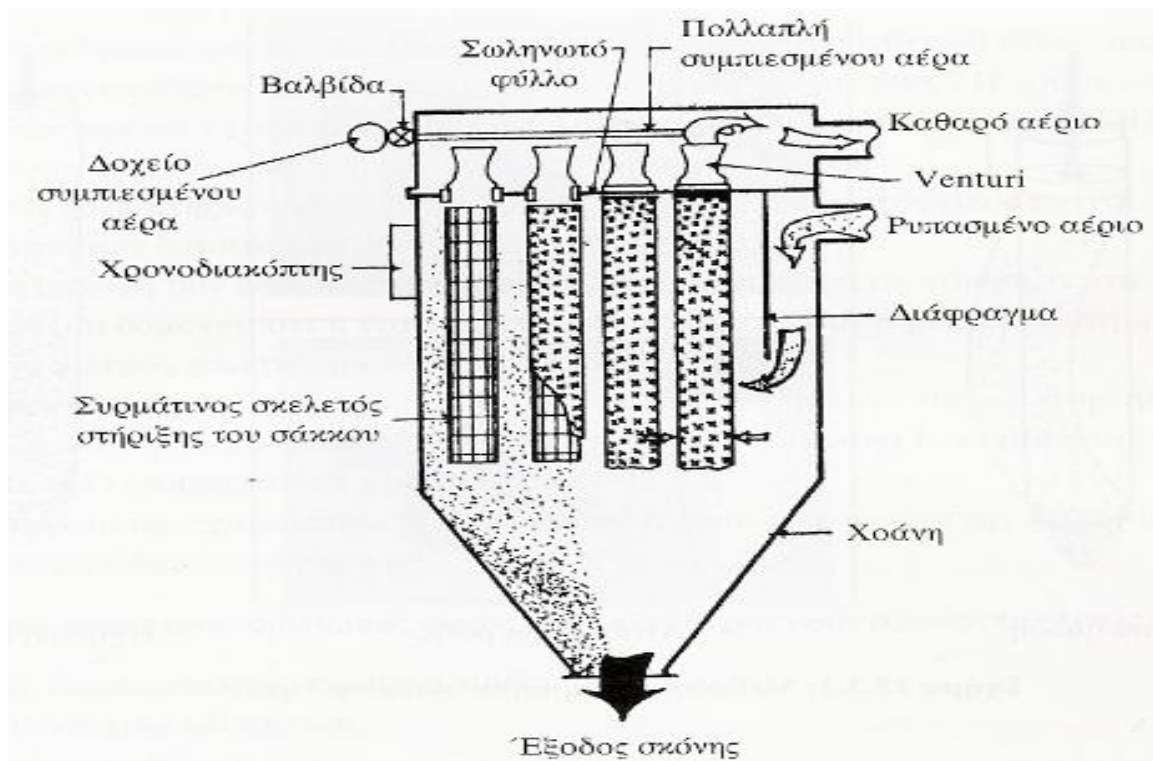
6.3.1.2 Υφασματόφιλτρα (ή Σακόφιλτρα)

Γενικά, τα φίλτρα ανάλογα με τον τρόπο που συγκρατούν τα αιωρούμενα σωματίδια για να τα διαχωρίσουν από ένα αέριο ρεύμα, χωρίζονται σε σακόφιλτρα ή φίλτρα επιφανείας και σε φίλτρα βαθιάς διήθησης ή φίλτρα βάθους. Τα φίλτρα επιφανείας, τα οποία όταν έχουν σχήμα σάκου ονομάζονται σακόφιλτρα, συγκρατούν τα σωματίδια στην μία επιφάνεια ενός πορώδους υλικού, π.χ. ενός κατάλληλου υφάσματος. Τα φίλτρα βάθους συγκρατούν τα σωματίδια κύρια στο εσωτερικό του πορώδους υλικού και όχι μόνο στην επιφάνειά του.

Τα υφασματόφιλτρα είναι συσκευές αντιρρυπαντικής τεχνολογίας οι οποίες χρησιμοποιούνται για τον καθαρισμό των βιομηχανικών αερίων από στερεά σωματίδια.

Τα απαέρια, με τη βοήθεια ανεμιστήρα που βρίσκεται στη συσκευή (καθαρό τμήμα του αγωγού), αναγκάζονται να διέλθουν μέσω πορώδους υλικού, που στην επιφάνεια του (κυρίως) γίνεται η κατακράτηση των σωματιδίων. Τα σωματίδια αυτά με την πάροδο του χρόνου (και τη λειτουργία της συσκευής) δημιουργούν μια στερεή κρούστα (που στηρίζεται πάνω στην επιφάνεια του φίλτρου) η οποία χαρακτηρίζεται από πορώδη υφή (διαπερατότητα) και από κάποιο πάχος που είναι συνάρτηση του χρόνου. Επειδή η πτώση πίεσης του αέρα (απαέρια) καθώς αυτός διέρχεται διά της κρούστας των σωματιδίων εξαρτάται από το πάχος της κρούστας, η πτώση πίεσης αυξάνει με το χρόνο λειτουργίας της συσκευής (ή με την ποσότητα-όγκο των αερίων που καθαρίζονται) και συνεπώς η διαδικασία καθαρισμού πρέπει να διακόπτεται περιοδικά ώστε να απαλλαγεί το φίλτρο από την κρούστα των σωματιδίων. (Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013)

Σχήμα 5.9. Γενική διάταξη υφασματοφίλτρου



Πηγή: Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013

Τα προς επεξεργασία βιομηχανικά απαέρια έχουν θερμοκρασίες μέχρι και 200° ή 300°C , ενώ διαφέρουν ως προς τη χημική τους τοξικότητα, έχοντας pH βασικό, ουδέτερο ή και όξινο. Έτσι ανάλογα με τη χημική συμπεριφορά των απαερίων είναι και η επιλογή του υλικού του υφασματοφίλτρου ώστε να αντέχει στη θερμοκρασία και στο διαβρωτικό ή μη περιβάλλον των απαερίων. Επίσης, το υλικό του υφασματοφίλτρου φθείρεται και λόγω μηχανικών καταπονήσεων, ιδιαίτερα κατά διαδικασία καθαρισμού του από την κρούστα των σωματιδίων αλλά και λόγω μηχανικών τριβών των ινών του υφασματοφίλτρου με τα σωματίδια των απαερίων. Μια άλλη παράμετρος σημαντικής επιλογής του υλικού είναι η μηχανική αντοχή της ίνας του υφασματοφίλτρου καθώς και ο τρόπος ύφανσης της.

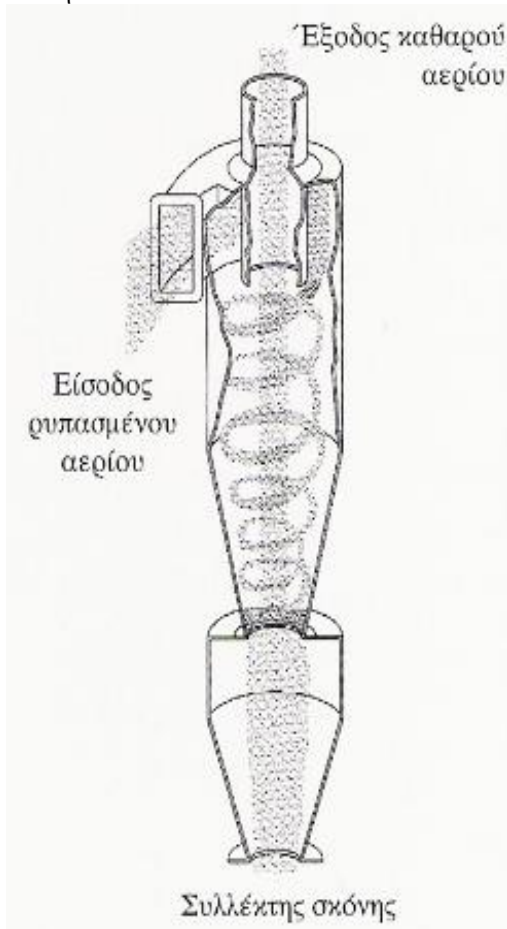
Από τα προηγούμενα συνάγεται ότι οι βασικές λειτουργικές παράμετροι που επηρεάζουν την επιλογή και διαστασιολόγηση ενός υφασματοφίλτρου είναι:

- Η θερμοκρασία απαερίων
- Το pH των απαερίων
- Ο τρόπος καθαρισμού των υφασματοφίλτρων
- Το είδος των σωματιδίων (εύφλεκτα, άφλεκτα)
- Η διάμετρος των σωματιδίων
- Η συγκέντρωση των σωματιδίων στα απαέρια
- Η πτώση πίεσης
- Ο βαθμός απόδοσης
- Η διάρκεια ζωής του υφασματοφίλτρου
- Η μέση ταχύτητα φιλτραρίσματος (παροχή απαερίων προς επιφάνεια υφασματοφίλτρων)

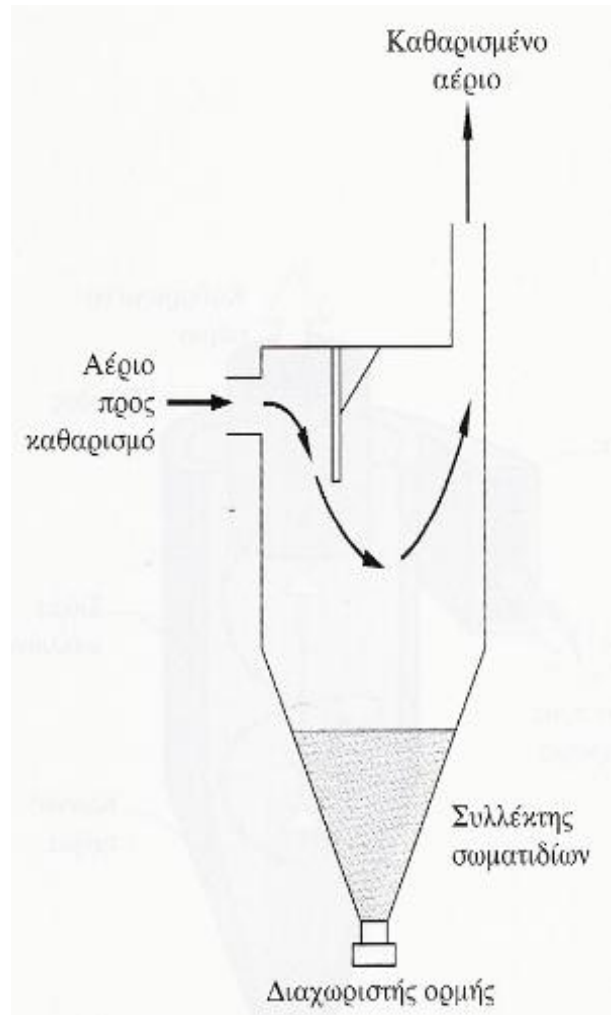
6.3.1.3 Φυγοκεντρικοί συλλέκτες

Οι φυγοκεντρικοί συλλέκτες ή φυγοκεντρικοί διαχωριστές σωματιδίων (Σχήμα 5.10) ανήκουν στη γενική κατηγορία των αδρανειακών συλλεκτών (Σχήμα 5.11), όπου τα σωματίδια (σωματιδιακοί ρυπαντές) που περιέχονται στα αερία κατακρατούνται από το ρεύμα των αερίων λόγω της μείωσης της ταχύτητας τους (π.χ. δεξαμενές βαρυτικής κατακάθισης) ή μεταβολής της κατεύθυνσης κίνησης τους. Στους φυγοκεντρικούς συλλέκτες, ο διαχωρισμός επιτυγχάνεται με την ανάπτυξη στα σωματίδια φυγόκεντρης δύναμης. Επειδή η φυγόκεντρη δύναμη που αναπτύσσεται μπορεί να είναι πολλές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τη δύναμη της βαρύτητας, τα σωματίδια κατακρατούνται σε διατάξεις με πολύ μικρότερες διαστάσεις σε σύγκριση με εκείνες των θαλάμων ηρεμίας, δηλαδή των διατάξεων διαχωρισμού με βαρυτική καθίζηση. Στους τελευταίους, τα σωματίδια κατακρατούνται με καθίζηση λόγω βαρύτητας, αφού πρώτα μειωθεί σημαντικά η ταχύτητα των αερίων εισερχόμενα σε θάλαμο μεγάλων διαστάσεων. Στην κατηγορία των φυγοκεντρικών διαχωριστών κατατάσσονται οι δυναμικοί διαχωριστές και οι κυκλώνες. (Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013)

Σχήμα 5.10. Τυπική διάταξη φυγοκεντρικού συλλέκτη



Πηγή: Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013



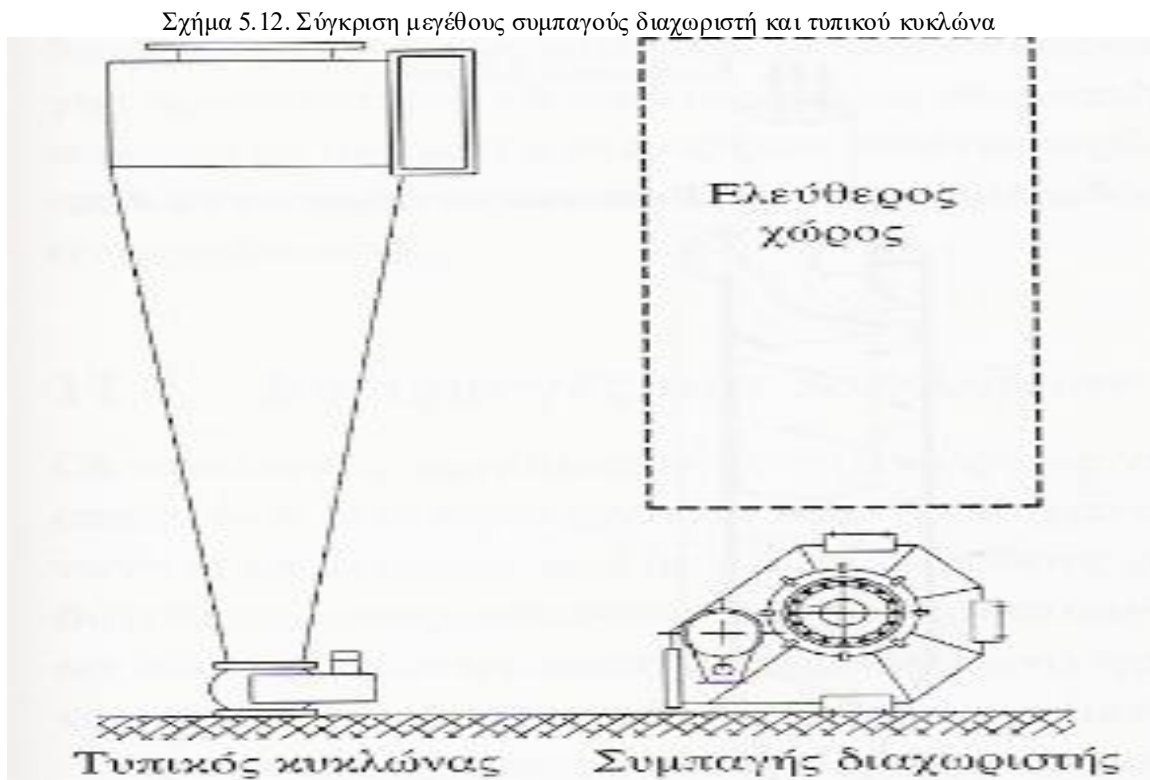
Πηγή: Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013

Σχήμα 5.11. Τυπική διάταξη αδρανειακού συλλέκτη

6.3.1.3.1 Δυναμικοί διαχωριστές

Οι δυναμικοί διαχωριστές (dynamic precipitators) είναι συμπαγείς μονάδες που προσδίδουν στα σωματίδια με την επενέργεια στρεφομένων πτερυγίων περιστροφική τροχιά για την ανάπτυξη της φυγόκεντρης δύναμης. Η δύναμη αυτή μπορεί να είναι μέχρι και τάξη μεγέθους μεγαλύτερη από τη φυγόκεντρη δύναμη ενός απλού κυκλώνα ίδιας δυναμικότητας, ενώ οι διατάξεις αυτές έχουν σημαντικά μικρότερες διαστάσεις (Σχήμα 5.12).

Μονάδες τέτοιου τύπου που μπορούν να αποτελέσουν συγχρόνως εκτός από συλλέκτες σωματιδίων και ανεμιστήρες ελκυσμού, χρησιμοποιούνται συχνό, σε βιομηχανίες τροφίμων, κεραμοποιίας, επεξεργασίας ξύλου και φαρμακοβιομηχανίες. Μειονέκτημα των δυναμικών διαχωριστών είναι ότι δεν μπορούν να διαχειρισθούν απαέρια που περιέχουν υγρά ή ιώδη υλικά, επειδή τα υλικά αυτά μπορεί να προσκολληθούν και να επικαθήσουν πάνω στα πτερύγια ή να προκαλέσουν σοβαρά προβλήματα διάβρωσης στα πτερύγια και στο σπειροειδές κέλυφος λόγω ισχυρής πρόσκρουσης τους πάνω στις επιφάνειες. (Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013)



Πηγή: Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013

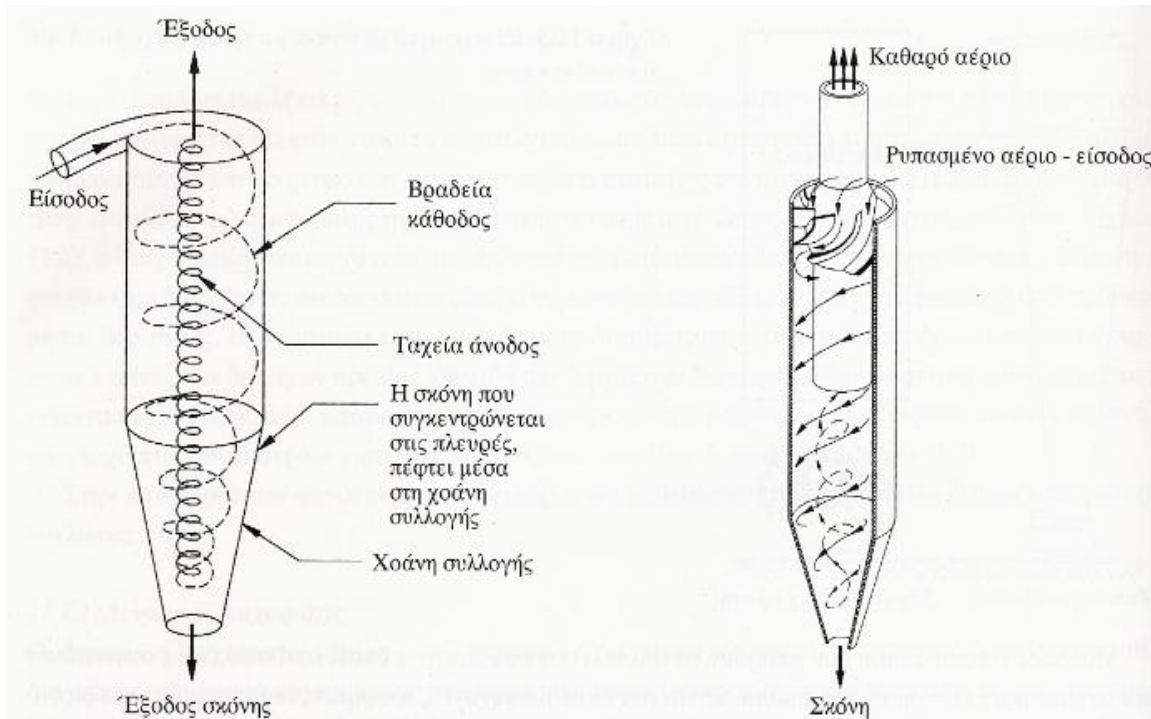
6.3.1.3.2 Κυκλώνες

Οι κυκλώνες (cyclones) είναι η πλέον συνήθης κατηγορία φυγόκεντρικοί διαχωριστών που χρησιμοποιούνται στις παραγωγικές διαδικασίες για την κατακράτηση σωματιδίων μέσου και μεγάλου μεγέθους. Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε εκτενέστερα με αυτή μόνο την κατηγορία συλλεκτών σωματιδίων. Ένας κυκλώνας αποτελείται από ένα συνδυασμό ενός κατακόρυφου κυλινδρικού τμήματος με ένα κωνικό, τη χοάνη συλλογής των σωματιδίων στο κάτω μέρος, και την είσοδο και έξοδο των αερίων. Το ρεύμα των αερίων με τα σωματίδια εισέρχεται στον κυκλώνα εφαπτομενικά, ή και αξονικά (Σχήμα 5.13). Ο αγωγός εξόδου των καθαρισμένων αερίων είναι ένα κεντρικό κυλινδρικό άνοιγμα στην οροφή του κυκλώνα. Τα σωματίδια της σκόνης συγκεντρώνονται στον πυθμένα, στη χοάνη συλλογής, από όπου απομακρύνονται για επαναχρησιμοποίηση ή απόθεση.

Έτσι, ένας κυκλωνικός διαχωριστής μπορεί να προσδιορισθεί ως μία κατασκευή χωρίς κινούμενα τμήματα, όπου τα απαέρια αναγκάζονται, λόγω κατάλληλης διαμόρφωσης της εισόδου, να περιστραφούν σε κυκλική τροχιά. Κατά την περιστροφή, η ταχύτητα εισόδου των απαερίων μετασχηματίζεται σε ένα στρόβιλο στον οποίο οι φυγόκεντρες δυνάμεις που αναπτύσσονται ενεργούν πάνω στα αιωρούμενα σωματίδια και τα οδηγούν στα τοιχώματα του κυλίνδρου, όπου προσκρούουν και πέφτουν στη χοάνη συλλογής.

Οι κυκλώνες χρησιμοποιούνται μεμονωμένα ή και σε διάταξη (πολλαπλοί κυκλώνες), για διαχείριση μεγαλύτερων όγκων απαερίων. (Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013)

Σχήμα 5.13. Τύποι κυκλώνων



Πηγή: Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013

Οι κυκλώνες έχουν σχετικά απλή κατασκευή, ενώ η απουσία κινουμένων τμημάτων μειώνει σημαντικά το αρχικό κόστος και το κόστος συντήρησής τους, ως προς τα αντίστοιχα κόστη διατάξεων υφασματόφιλτρων ή ηλεκτροστατικών φίλτρων ίδιας κατ' όγκο αερίων δυναμικότητας. Η απόδοση, όμως, κατακράτησης των κυκλώνων δεν είναι τόσο υψηλή όσο των άλλων διατάξεων. Για το λόγο αυτό οι φυγόκεντρικοί διαχωριστές, όπως και όλοι οι αδρανειακοί διαχωριστές, χρησιμοποιούνται συνήθως ως προσυλλέκτες, για προκαταρκτική κατακράτηση σωματιδίων, τοποθετημένοι ανάντι των άλλων διατάξεων, με σκοπό αφενός τη μείωση του φορτίου των απαερίων (συγκέντρωση σωματιδίων) και αφετέρου την απομάκρυνση των μεγαλύτερων σε μέγεθος σωματιδίων που προκαλούν και τις μεγαλύτερες φθορές στις διατάξεις αντιρρύπανσης.

Οι κυκλώνες χρησιμοποιούνται ευρέως για την κατακράτηση αιωρούμενων σωματιδίων από τη μάζα απαερίων που προέρχονται από βιομηχανικές λειτουργίες, μειώνοντας το φορτίο σκόνης και απομακρύνοντας τα μεσαίου και μεγάλου μεγέθους σωματίδια που προκαλούν φθορές στις σωληνώσεις ή σε άλλες διατάξεις αντιρρύπανσης. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αύξηση του χρόνου ζωής των άλλων διατάξεων που βρίσκονται κατάντι του κυκλώνα και ειδικότερα των υφασματόφιλτρων, όταν αυτά χρησιμοποιούνται για την τελική κατακράτηση των σωματιδίων.

Συνήθεις χρήσεις των κυκλώνων είναι η κατακράτηση σκόνης που προέρχεται από τις διαμορφώσεις και κατεργασίες σε ξυλουργεία και μηχανουργεία, όπως επίσης από τη διαχείριση υλικών

στις βιομηχανίες, όπως βιομηχανίες ζωοτροφών και δημητριακών, βιομηχανίες τροφών και ποτών, τσιμεντοβιομηχανίες και στις διαδικασίες θρυμματισμού, όπως είναι η διάσπαση βράχων, η διαχείριση μεταλλευμάτων και οι διαδικασίες όπου χρησιμοποιείται άμιμος (αμμοβολές, έτοιμο σκυρόδεμα κ.λπ.). Χρησιμοποιούνται επίσης στην ανάκτηση της σκόνης των καταλυτών στη βιομηχανία πετρελαίου.

Οι διατάξεις πολλαπλών κυκλώνων χρησιμοποιούνται στους λέβητες ορυκτών καυσίμων για τον προκαταρκτικό καθαρισμό, κυρίως από την ιπτάμενη τέφρα, των μεγάλων όγκων απαερίων που δημιουργούνται.

Για σωματίδια μεγαλύτερα από 200 μμ. απαιτείται η τοποθέτηση πρώτα ενός θαλάμου ηρεμίας, καθώς είναι περισσότερο ανθεκτικός στις φθορές, για λειτουργία ως προσυλλέκτη, πριν τα απαέρια εισέλθουν στον κυκλώνα.

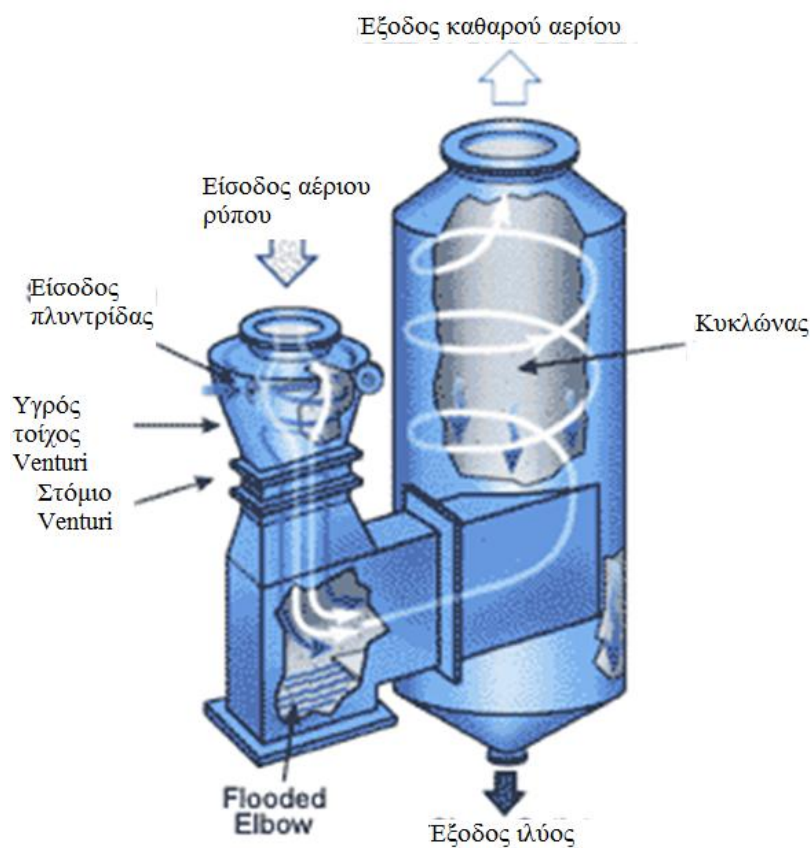
6.3.2 Τεχνικές αντιμετώπισης διοξειδίου του θείου (SO₂)

Πλυντρίδες χημικά μετατρέπουν τα αέρια διοξείδιο του θείου, χλώριο και διοξείδιο χλωρίου έτσι ώστε να παραμείνουν στο χημικό διάλυμα της πλυντρίδας. Ο έλεγχος των όξινων αερίων μπορεί να επιτευχθεί από ξηρά, ημίξηρα και υγρά συστήματα καθαρισμού αερίων.

6.3.2.1 Ξηρές διαδικασίες

Τα ξηρά συστήματα προϋποθέτουν την επαφή ενός βασικού προσροφητή συνήθως ασβέστη, με τα απαέρια σε σωλήνα Ventouri, όπου ο προσροφητής αντιδρά με τα οξέα του αερίου (Σχήμα 5.14). Το προϊόν της αντίδρασης καθώς και η περίσσεια του προσροφητή παγιδεύονται στην επιφάνεια ενός υφασμάτινου φίλτρου.

Σχήμα 5.14. Πλυντρίδα τύπου Venturi



Πηγή: Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013

Τα ξηρά συστήματα είναι απλά, με χαμηλό κόστος κεφαλαίου, αλλά μειωμένη απόδοση (ειδικά για τα SO₂, είναι μόνο 50%), ενώ ταυτόχρονα απαιτούν και σημαντικές ποσότητες χημικών αντιδραστηρίων. Εξαιτίας της μικρής τους απόδοσης, τα συστήματα αυτά είναι αμφίβολο αν μπορούν να επιτύχουν τα απαιτούμενα όρια εκπομπών για τις εγκαταστάσεις καύσης.

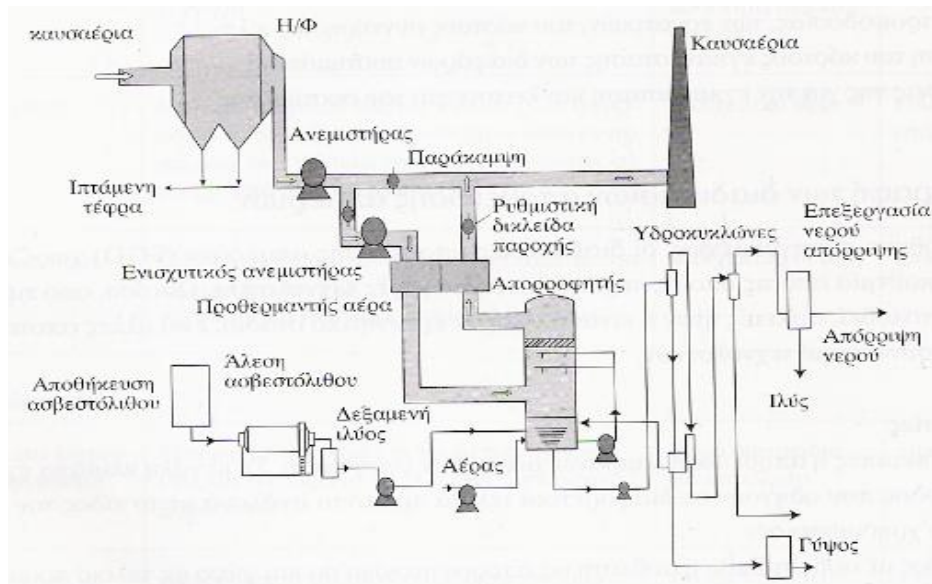
6.3.2.2 Ημίξηρες διαδικασίες

Τα ημίξηρα συστήματα είναι πιο αποτελεσματικά και μπορούν να επιτύχουν απομάκρυνση έως και 90% για τα SO₂, ενώ για το HCl και το HF πάνω από 99%. Τα ημίξηρα συστήματα, φέρνουν σε επαφή τα αέρια με ρευστοποιημένο ασβέστη μέσα σε έναν αντιδραστήρα. Ο ρευστοποιημένος ασβέστης έχει μεγάλη ειδική επιφάνεια, στην οποία τα όξινα αέρια προσροφώνται αποτελεσματικά, επιτρέποντας την αντίδραση του ασβέστη με τα οξέα των αερίων. Το τελικό προϊόν της διεργασίας είναι ξηρή σκόνη, αποτελούμενη κυρίως από άλατα ασβεστίου, η οποία συλλέγεται με την βοήθεια ενός ηλεκτροστατικού διαχωριστή ή ενός υφασμάτινου φίλτρου.

6.3.2.3 Υγρές διαδικασίες

Τα υγρά συστήματα καθαρισμού αερίων είναι ακόμα πιο αποτελεσματικά (απομάκρυνση πάνω από 98% για τα SO₂, και πάνω από 99% για το HCl και το HF) και συνήθως πιο οικονομικά από τα ημίξηρα συστήματα (Σχήμα 5.15). Αυτοί φαίνεται να είναι οι λόγοι για τους οποίους τα υγρά συστήματα καθαρισμού αερίων χρησιμοποιούνται ευρύτερα στην επεξεργασία των απαερίων των αποτεφρωτών, παρά το μειονέκτημα παραγωγής υγρών αποβλήτων τα οποία θα πρέπει να υποστούν επεξεργασία. Τα υγρά συστήματα καθαρισμού αερίων επανακυκλοφορούν τον προσροφόντα ρευστοποιημένο ασβέστη μέσα σε δοχείο εκθέτοντας μεγάλες ποσότητες ρευστοποιημένου ασβέστη στα αέρια. Οι μεγάλες ποσότητες περίσσειας νερού (ή επεξεργασμένων λυμάτων) που έρχονται σε επαφή με τα αέρια, μειώνουν τη θερμοκρασία των αερίων στο επίπεδο του αδιαβατικού κορεσμού. Στη θερμοκρασία αυτή, γίνεται η προσρόφηση των οξέων στην αποδοτική υγρή φάση. Υψηλές αποδόσεις μπορεί να επιτευχθούν με την χρήση μόνο 3-5% περίσσειας αντιδραστηρίων. Οι δύο τύποι αντιδραστηρίων που κυρίως χρησιμοποιούνται είναι ο ρευστοποιημένος ασβέστης και η καυστική σόδα (NaOH), η οποία είναι και πιο ακριβή. (Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013)

Σχήμα 5.15. Διάταξη υγρής αποθείωσης



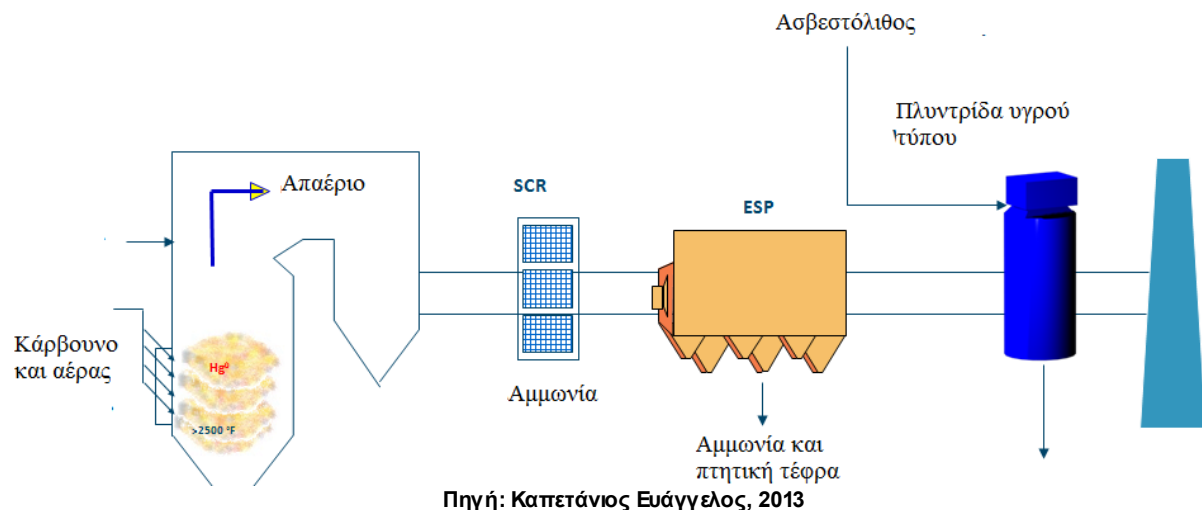
Πηγή: Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013

Μια ακόμη τεχνική μείωσης των εκπομπών SO₂ είναι και η χρήση φίλτρων κλίνης ενεργού άνθρακα.

6.3.3 Τεχνικές αντιμετώπισης οξειδίων του αζώτου (NO_x)

Ο έλεγχος των NO_x είναι δυνατός με την κατάλληλη επιλογή του κλιβάνου και των συνθηκών λειτουργίας του. Περαιτέρω πρόσθετος έλεγχος των NO_x μπορεί να επιτευχθεί με καταλυτική διάσπαση και αναγωγή (Σχήμα 5.16). Η καταλυτική διάσπαση προϋποθέτει έκθεση των αερίων σε καταλύτη, με αποτέλεσμα την αναγωγή των NO_x σε N₂. Με παρόμοιο τρόπο, έκθεση των αερίων σε καταλύτη, με ταυτόχρονη χρήση αμμωνίας ως μέσου αναγωγής, οδηγεί σε διάσπαση των NO_x σε N₂. Οι διαδικασίες αυτές, μπορούν να μειώσουν τη συγκέντρωση των NO_x έως και 90%. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου αφορούν κυρίως στο υψηλό κόστος και στο ενδεχόμενο φθοράς του συστήματος από τα βαρέα μέταλλα. Ένα πιο οικονομικό σύστημα, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί στους αποτεφρωτές για τον περαιτέρω έλεγχο των NO_x, είναι ένα θερμικό σύστημα με μέσο αναγωγής την αμμωνία ή την υγρή ουρία, χωρίς όμως την προσθήκη καταλυτών. Το σύστημα αυτό επιτυγχάνει μείωση των NO_x κατά 40-60%. (Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013)

Σχήμα 5.16. Σχεδιάγραμμα επιλεκτικής καταλυτικής αναγωγής - SCR



Οι αέριοι ρύποι των διοξειδίων και φουράνων μπορούν να μειωθούν εκτός της χρήσης των BATs, με κατάλληλες επεξεργασίες όπως με τη χρήση υπεριώδους φωτός, ηλιακού φωτός ή ακόμα και με βιολογικές διεργασίες. Επίσης, η κομποστοποίηση της τέφρας μειώνει τις συγκεντρώσεις των συγκεκριμένων ρύπων μέχρι 50%.

6.4 Τεχνικές επεξεργασίας στερεών αποβλήτων

Οι σταθμοί στέλνουν περισσότερο από 70% των στερεών αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής. Κάποιοι σταθμοί αποτεφρώνουν τα απόβλητα ξύλου και την ιλύ, ενώ άλλοι πειραματίζονται με την ωφέλιμη χρήση της ιλύος.

Αυτοί που αποτεφρώνουν τα απόβλητα χρησιμοποιούν κάποια από τις τεχνικές θερμικής επεξεργασίας. Κίνητρα για αυτήν την μέθοδο είναι η πιθανότητα ικανοποίησης της θερμικής ενέργειας και ηλεκτρικών αναγκών χρησιμοποιώντας μία φτηνή και διαθέσιμη αποτεφρωμένη πρώτη ύλη, και η πιθανότητα μείωσης “άχρηστων αποβλήτων”. Οι τεχνικές αυτές είναι η καύση, η πυρόλυση, η αεριοποίηση και η αεριοποίηση με πλάσμα.

Η θερμική επεξεργασία των απορριμμάτων στοχεύει κυρίως:

- Στην ελαχιστοποίηση του τελικού προς διάθεση όγκου απορριμμάτων.
- Στην πλήρη αξιοποίηση όλων των καύσιμων συστατικών τους.
- Στην παραγωγή αξιοποιήσιμης ενέργειας και η βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης.
- Στην τήρηση όλων των νομικών περιορισμών, όσον αφορά τις κάθε είδους περιβαλλοντικές οχλήσεις (ειδικότερα η αποφυγή δημιουργίας και εκπομπής οργανικών ενώσεων όπως διοξίνες και φουράνες).

Η καύση με την ακριβή ποσότητα οξυγόνου που χρειάζεται για πλήρη καύση είναι γνωστή ως στοιχειομετρική καύση. Η καύση με περισσότερο οξυγόνο από το αναγκαίο για την στοιχειομετρική καύση ονομάζεται καύση με περίσσεια οξυγόνου. Και στις δύο περιπτώσεις χρησιμοποιείται ο όρος αποτέφρωση. Η αεριοποίηση είναι η μερική καύση κάτω από υποστοιχειομετρικές συνθήκες για την παραγωγή ενός μίγματος αερίων το οποίο περιέχει μονοξείδιο του άνθρακα, υδρογόνο και κορεσμένους υδρογονάνθρακες. Η πυρόλυση είναι η θερμική επεξεργασία σε πλήρη απουσία οξυγόνου.

6.4.1 Αποτέφρωση

Η αποτέφρωση υπολειμμάτων (απορριμμάτων και ιλύος), συνδυασμένη με παραγωγή ενέργειας και ατμού, είναι μία από τις πιο κοινά εφαρμοσμένες μεθόδους επεξεργασίας στην Ευρώπη. Αυτή η τεχνική μπορεί να εφαρμοστεί σε σχεδόν όλους τους τύπους ιλύων, συμπεριλαμβανομένης της δευτεροβάθμιας ή βιολογικής ιλύος.

Οι αποτεφρωτήρες ρευστοποιημένης κλίνης χρησιμοποιούνται ευρύτατα στην καύση προεπεξεργασμένων απορριμμάτων. Χρησιμοποιούνται για δεκαετίες τέτοιοι αποτεφρωτήρες για την καύση κυρίως ομογενών καυσίμων όπως το κάρβουνο, ο λιγνίτης, τα λύματα υπονόμων και καύσιμα βιομάζας (πχ ξύλο). Το κύριο επίτευγμα της αποτέφρωσης είναι η μείωση της ποσότητας υλικού που απορρίπτεται σε χωματερές κατά 80 – 90%.

Τέτοιοι αποτεφρωτήρες αποτελούνται από μια γραμμή θαλάμων καύσης, σε μορφή κάθετων κυλίνδρων. Στο χαμηλότερο επίπεδο, ένα στρώμα από αδρανές υλικό (πχ άμμος ή τέφρα) πάνω σε μια σχάρα ή δίσκο ρευστοποιείται με την βοήθεια του αέρα. Τα προς καύση απορρίμματα συνεχώς τροφοδοτούν την ρευστοποιημένη αυτή κλίνη, από το πάνω μέρος της ή από τα πλάγια. Προθερμασμένος αέρας εισάγεται μέσα στον θάλαμο καύσης μέσω ανοιγμάτων που βρίσκονται στην κλίνη, δημιουργώντας το ρευστό προς καύση (αποτελούμενο και από άμμο) μέσα στον θάλαμο καύσης. Τα απορρίμματα εισέρχονται μέσα στον θάλαμο με την βοήθεια αντλίας, αρπάγης ή μεταφορικού κοχλίου.

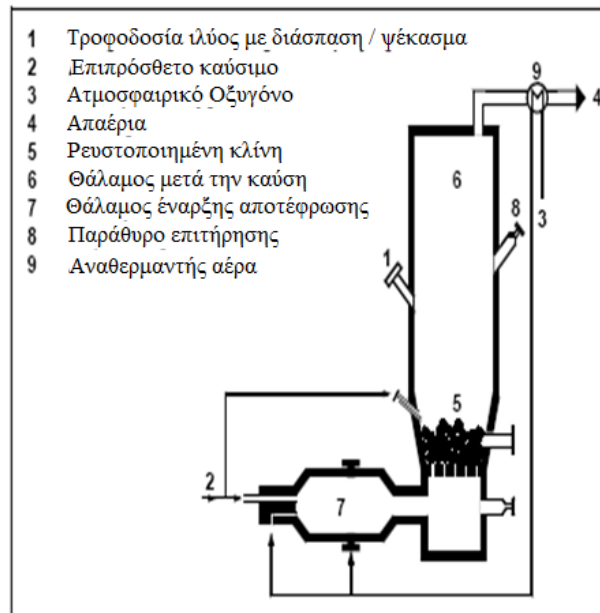
Σε αυτήν την κλίνη πραγματοποιείται ξήρανση, πτητικοποίηση, ανάφλεξη και τελικά καύση. Η θερμοκρασία λειτουργίας στη ελεύθερη επιφάνεια πάνω από την κλίνη είναι της τάξης των 850 με 950 °C. Η περιοχή αυτή σχεδιάζεται έτσι ώστε να διατηρεί για κάποιο χρονικό διάστημα τα παραγόμενα αέρια μέσα στην ζώνη καύσης. Πάνω στην κλίνη στην πράξη η θερμοκρασία είναι χαμηλότερη, γύρω στους 650 °C.

Για να ξεκινήσει η διαδικασία της καύσης, η ρευστοποιημένη κλίνη πρέπει να θερμανθεί σε θερμοκρασία ίση με την κατώτερη θερμοκρασία ανάφλεξης των προστιθέμενων απορριμμάτων (ή και μεγαλύτερη αν το απαιτούν οι προδιαγραφές). Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την προθέρμανση του αέρα με καυστήρες πετρελαίου ή αερίου, οι οποίοι βρίσκονται σε λειτουργία μέχρι η καύση να μπορεί να πραγματοποιηθεί αυτόματα. Συνήθως ένα σημαντικό μέρος της τέφρας μεταφέρεται με τα παραγόμενα αέρια και απαιτούνται ειδικά φίλτρα για την απομάκρυνση της. Από την άλλη μεριά το κύριο μέρος της τέφρας σε μορφή κατώτατης τέφρας, απομακρύνεται από την κλίνη με ειδικό τρόπο.

Ο προθερμασμένος αέρας κινείται μέσα από την πλάκα διανομής και ρευστοποιεί (συμπαράσύρει) το υλικό πάνω στην κλίνη (Σχήμα 5.17). Ανάλογα με τον σχεδιασμό και τις απαιτήσεις, χρησιμοποιούνται διάφορα υλικά πάνω στην κλίνη όπως σιλικονούχα άμμος, βασάλτης, μηλίτης κτλ, με ονομαστικές διαστάσεις από 0.5 έως 3 mm . Τα απορρίμματα δύναται να

τροφοδοτηθούν μέσω ειδικής κεφαλής, στα πλαϊνά του με την βοήθεια μεταφορών ταινιών ή απευθείας να «ψεκάστουν» πάνω στην κλίνη. Στην κλίνη τα απορρίμματα τεμαχισμένα και αναμιγνύονται με τα θερμά υλικά της κλίνης, ξηραίνονται και μερικώς αποτεφρώνονται. Τα παραμένοντα τμήματα (πηκτικά και πολύ λεπτά μόρια) αποτεφρώνονται τελικά στον χώρο ακριβώς πάνω από την κλίνη. Η ξήρανση και η αφύγρανση σαν στάδια προ-επεξεργασίας σχεδιάζονται έτσι ώστε να επιτραπεί η καύση των τεμαχίων χωρίς την επιπλέον χρήση καυσίμων. (Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013)

Σχήμα 5.17. Στατική ρευστοποιημένη κλίνη



Πηγή: Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013

Τέλος η ανακτώμενη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο στάδιο αυτό της ξήρανσης. Κατά την έναρξη της διάταξης, ή στην περίπτωση που η ποιότητα των προς καύση υλικών είναι χαμηλή, γίνεται χρήση επιπρόσθετων καυσίμων για να επιτευχθεί η κατάλληλη θερμοκρασία λειτουργίας (850 °C). Σε πολλές εγκαταστάσεις γίνεται χρήση νερού το οποίο ψεκάζεται μέσα στον θάλαμο για τον έλεγχο την θερμοκρασίας μέσα σε αυτόν.

Με την αποτέφρωση, τα στερεά απόβλητα μετατρέπονται σε διοξείδιο του άνθρακα, νερό και τέφρα. Τα μειονεκτήματα της διεργασίας αυτής είναι το υψηλό κόστος λειτουργίας, οι ανεπιθύμητες ατμοσφαιρικές εκπομπές και η παραγωγή επικίνδυνων αποβλήτων.

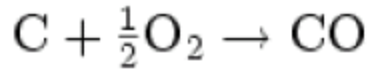
6.4.2 Αεριοποίηση

Η αεριοποίηση (Gasification) είναι η διαδικασία η οποία μετατρέπει υλικά με βάση τον άνθρακα, όπως γαιάνθρακα, πετρέλαιο και τα παράγωγά του, βιομάζα κτλ, σε μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο αντιδρώντας το αρχικό υλικό σε υψηλή θερμοκρασία με ελεγχόμενη ποσότητα οξυγόνου ή ατμού. Το παραγόμενο μείγμα αερίων ονομάζεται σύνθετο αέριο (synthesis gas) ή syngas και το οποίο αποτελεί πολύ καλής ποιότητας καύσιμο. Η αεριοποίηση είναι από τις ιδιαίτερα επαρκής μέθοδος εξαγωγής ενέργειας από διάφορα οργανικά υλικά, και βρίσκει εφαρμογής στις λεγόμενες καθαρές τεχνικές.

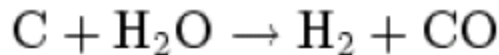
Πλεονέκτημα της αεριοποίησης είναι ότι η αξιοποίηση των syngas είναι αποδοτικότερη από την άμεση καύση των αρχικών καυσίμων, με το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που περιλαμβάνεται στα καύσιμα να εξάγεται.

Σε μία διάταξη αεριοποίησης εμφανίζονται τα εξής στάδια:

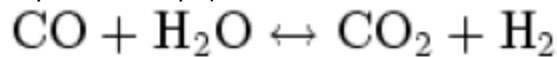
- **Πυρόλυση:** πραγματοποιείται όταν οι ενώσεις του άνθρακα θερμαίνονται. Παράγονται πτητικά αέρια και πίσσα με ταυτόχρονη μείωση κατά 70% του όγκου του αρχικού καυσίμου. Η διαδικασία εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την σύσταση των αρχικών ενώσεων του άνθρακα η οποία και τελικά καθορίζει την σύσταση της παραγόμενης πίσσας που στην συνέχεια θα υποβληθεί σε αεριοποίηση.
- **Καύση:** στο στάδιο αυτό τα πτητικά προϊόντα και μερική πίσσα αντιδρούν με το οξυγόνο προς την δημιουργία διοξειδίου και μονοξειδίου του άνθρακα, παρέχοντας την θερμότητα για το διαδοχικό στάδιο της αεριοποίησης.



- **Αεριοποίηση:** η οποία λαμβάνει χώρα καθώς η πίσσα αντιδρά με το διοξείδιο του άνθρακα και τον ατμό προς δημιουργία μονοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου μέσω της αντίδρασης.

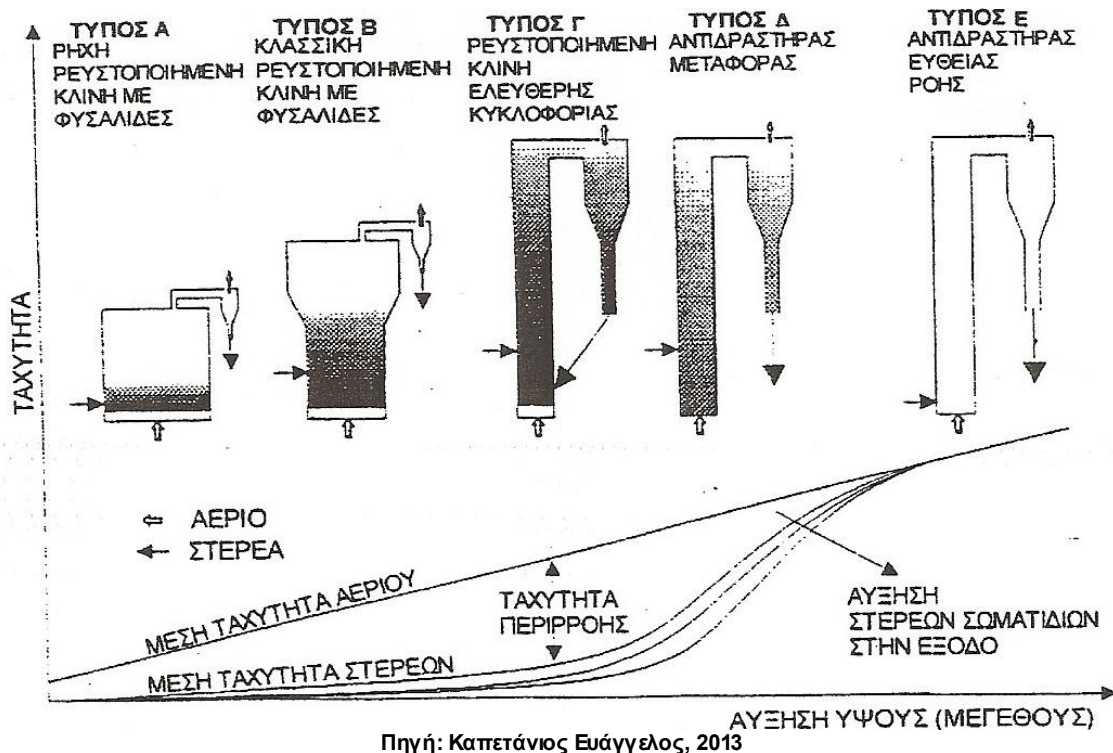


Επιπροσθέτως, η αντίθετη αντίδραση πραγματοποιείται με αποτέλεσμα να έρχεται το σύστημα σε ισορροπία πολύ γρήγορα στις μεγάλες θερμοκρασίες που αναπτύσσονται μέσα στην διάταξη. Έτσι μέσα στον αντιδραστήρα έχουμε σε ισορροπία συγκεντρώσεις μονοξειδίου του άνθρακα, ατμού, διοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου.



Όλες οι σύγχρονες τεχνικές και τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία για την αεριοποίηση στερεών καυσίμων (κάρβουνο, RDF, κ.α.) σε μεγάλη κλίμακα (>3MWe), βασίζονται σε συστήματα αντιδραστήρων ρευστοποιημένης κλίνης. Αυτές οι διατάξεις αποδείχθηκαν ότι μπορούν να λειτουργούν εξίσου καλά για μεταβαλλόμενες συνθήκες διεργασιών (Σχήμα 5.18). (Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013)

Σχήμα 5.18. Οι κυριότεροι αντιδραστήρες αερίου – στερεού σύμφωνα με την ταχύτητα περριφοράς.



6.4.3 Πυρόλυση

Πυρόλυση είναι η μέθοδος ανάκτησης ενέργειας με την παραγωγή αερίου καυσίμου, κατά την οποία λαμβάνει χώρα φυσική και χημική αποσύνθεση των οργανικών ουσιών που βρίσκονται στα απορρίμματα υπό την επίδραση θερμότητας σε περιβάλλον απουσίας αέρα ή οξυγόνου. Είναι μια πολύ ελαστική διαδικασία, η οποία παρέχει τη δυνατότητα για παρασκευή πολλών καυσίμων από μια ποικιλία πρώτων υλών. Κατά την πυρόλυση διασπώνται χημικοί δεσμοί και λαμβάνονται προϊόντα υψηλού ενεργειακού περιεχομένου, τα οποία ανάλογα με τις συνθήκες, μπορεί να είναι στερεά, υγρά ή αέρια. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα μέσα σε ειδικό κλίβανο υπό πίεση, λίγο μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική σε θερμοκρασία 500°C, για την παραγωγή υγρού (λαδιού), ή μέχρι 700°C, οπότε παράγεται κυρίως αέριο και κάρβουνο. Η τροφοδοσία του κλιβάνου, ανάλογα με τον τύπο του, μπορεί να γίνεται είτε με ακατέργαστα απορρίμματα, είτε με κατεργασμένα σε μορφή μικρών τεμαχίων.

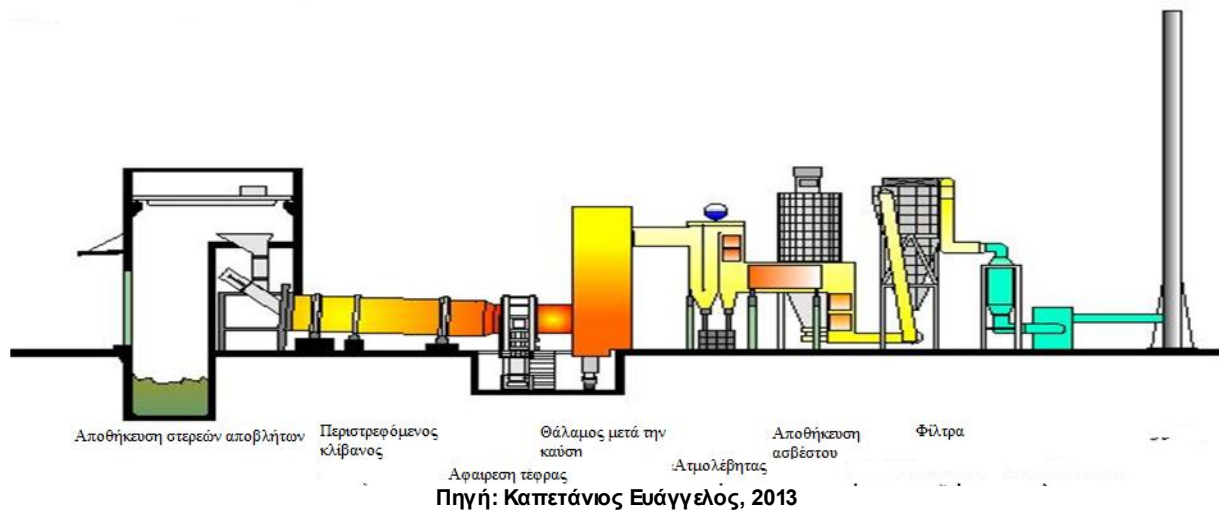
Κατά την πυρόλυση συμβαίνουν οι εξής διεργασίες:

- Η ξήρανση (100-200°C)
- Διάσπαση της οξειδωσης, αποθείωση, αρχή της διάσπασης του υδρόθειου και διοξειδίου του άνθρακα (250° C)
- Διάσπαση των συνδέσμων των αλιφατικών ενώσεων. Αρχή του διαχωρισμού του μεθανίου και άλλων αλιφατικών ενώσεων (340° C).
- Εμπλουτισμός του υλικού άνθρακα (380° C)
- Διάσπαση των δεσμών του άνθρακα-οξυγόνου και άνθρακα-αζώτου (400°C).
- Μετατροπή των πισσαοφαλτούχων υλικών σε καύσιμη ύλη και πίσσα (400° έως 600° C).
- Σχάση των πισσαοφαλτούχων υλικών σε υλικά ανθεκτικά στη θερμότητα.
- Δημιουργία αρωματικών ενώσεων (600°C).
- Θερμική δημιουργία σε βενζόλιο και άλλες αρωματικές ενώσεις αφυδρογόνωση του βουταδιενίου, κλπ. (>600°C).

Οι χημικές αντιδράσεις της πυρόλυσης είναι ενδόθερμες και η ενέργεια που παράγεται είναι 4 φορές μεγαλύτερη από την απαιτούμενη για την πυρόλυση θερμότητα. Από το παραγόμενο αέριο, ένα μέρος χρησιμοποιείται για να καλύψει τις ανάγκες της εγκατάστασης σε ενέργεια και το υπόλοιπο μπορεί να καεί επί τόπου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη βοήθεια αεριοστρόβιλου. Η σπουδαιότητα της πυρόλυσης ως μεθόδου θερμικής επεξεργασίας έγκειται στο γεγονός ότι επιτρέπει τη μετατροπή των απορριμμάτων και βιομάζας στερεάς μορφής, που είναι δύσκολο να διαχειριστούμε, σε αέρια και υγρά προϊόντα τα οποία έχουν τα πλεονεκτήματα της εύκολης μεταφοράς, αποθήκευσης και χρησιμοποίησης.

Η κύρια μέθοδος πυρόλυσης είναι με χρήση περιστρεφόμενου κλιβάνου (Σχήμα 5.19). Το προεπεξεργασμένο υλικό οδηγείται στον αντιδραστήρα πυρόλυσης που έχει την μορφή περιστρεφόμενου κυλίνδρου. Εκεί, σε θερμοκρασία γύρω στους 450°C, το οργανικό μέρος διασπάται σε αέρια φάση και σε στερεό υπόλειμμα. Για τη θέρμανση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί, εκτός από το παραγόμενο καύσιμο αέριο, κατά ένα ποσοστό και άλλη πηγή θερμότητας, όπως το φυσικό αέριο. Το παραγόμενο αέριο, μαζί με το εξανθράκωμα, με διάσταση κόκκου κάτω του 1 mm μεταφέρονται στην εστία καύσης, όπου καίγονται σε υψηλή θερμοκρασία, γύρω στους 1300°C. Στον ίδιο αντιδραστήρα γίνεται και τήξη των στερεών καταλοίπων, ώστε να προκύψει αδρανής υαλώδης μάζα. Η παραγόμενη θερμότητα αξιοποιείται για την παραγωγή ατμού. (Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013)

Σχήμα 5.19. Πυρόλυση σε περιστρεφόμενο κλίβανο



6.4.4 Κομποστοποίηση (Αερόβια αποσύνθεση)

Το ενδιαφέρον για τη μείωση κόστους και την εύρεση περισσότερων λύσεων μέσω επαναχρησιμοποίησης οδήγησε στην αναγνώριση τριών κομποστοποιήσιμων αποβλήτων, που είναι η ιλύς, ο φλοιός και η τέφρα.

Composting είναι η ελεγχόμενη βιοοξείδωση ετερογενών βιοαποδομήσιμων υλικών. Μια μεγάλη ποικιλία αερόβιων μικροοργανισμών (βακτήρια, μύκητες κ.λπ.) αποδομούν την οργανική ουσία παίρνοντας οι ίδιοι την ενέργεια και τα ζωτικά στοιχεία (άνθρακα, άζωτο, φώσφορος) που είναι απαραίτητα για το μεταβολισμό και πολλαπλασιασμό τους, ενώ ταυτόχρονα ελευθερώνουν ενέργεια, διοξείδιο του άνθρακα και νερό. Η αερόβια αποδόμηση είναι διεργασία όπου συντελείται σε διαδοχικά στάδια, με κύριο χαρακτηριστικό τη βαθμιαία μείωση της ποσότητας του περιεχόμενου βιοαποδομήσιμου οργανικού υλικού. Σε κάθε στάδιο, αναπτύσσεται και δρα μια συγκεκριμένη ομάδα μικροοργανισμών ανάλογα με τα ποιοτικά και ποσοτικά φυσικοχημικά χαρακτηριστικά του οργανικού υλικού.

Κατά τις διεργασίες βιοαποδόμησης του οργανικού υλικού από τις διαδοχικές ομάδες των μικροοργανισμών, τα σύνθετα μακρομόρια των οργανικών ενώσεων (οργανικός άνθρακας) μετασχηματίζονται σε διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), νερό (H_2O) και ένα τελικό προϊόν πλούσιο σε χουμικό περιεχόμενο, το κόμποστ. Οι μικροοργανισμοί, καταναλώνουν τμήματα του περιεχόμενου οργανικού άνθρακα, προκειμένου να αυξήσουν τον πληθυσμό τους δημιουργώντας νέες ομάδες μικροβίων. Παράλληλα, λόγω του γεγονότος ότι, η οξείδωση του οργανικού υλικού από τη δράση μικροοργανισμών είναι μια εξώθερμη αντίδραση, κατά την αερόβια αποδόμηση εκλύεται θερμότητα.

Η κομποστοποίηση μπορεί να είναι μία κατάλληλη επεξεργασία που απαλείφει τα συνηθισμένα προβλήματα των στερεών αποβλήτων, 1) βελτιώνοντας τα χαρακτηριστικά διαχείριση ιλύος και τέφρας, 2) μειώνοντας το βάρος, την περιεκτικότητα σε υγρασία και τον όγκο και 3) απομακρύνοντας τις οσμές.

Επιτυγχάνοντας την πλήρη κομποστοποίηση των πρωτοβάθμιων και δευτεροβάθμιων ιλύων και συγκρίνοντας το προϊόν με άλλα εμπορικά κομποστό, θεωρείται ένα από τα καλύτερα. Παρατηρείται αποσύνθεση κυτταρίνης από 40% σε 19% κατά την κομποστοποίηση πρωτοβάθμιας ιλύος.

Η γρήγορη κομποστοποίηση των στερεών με υψηλό άνθρακα (ιλύς, φλοιός, τέφρα) απαιτεί ένα συνδυασμό βέλτιστης υγρασίας και θρεπτικών συστατικών (λόγος άνθρακα / άζωτο C / N).

Η κομποστοποίηση γίνεται σε δοχεία από χάλυβα, μονωμένα ώστε να μην υπάρχει απώλεια θερμότητας, και αεριζόμενα χρησιμοποιώντας έλεγχο ανατροφοδότησης θερμοκρασίας με μία

προσαρμοζόμενη τιμή αναφοράς. Όταν η θερμοκρασία του κομπόστ ξεπερνά την τιμή αυτή, αέρας εισάγεται συνεχώς στο δοχείο. Όταν η θερμοκρασία του κομπόστ πέφτει κάτω από την τιμή αναφοράς, ο αέρας εισάγεται σταδιακά και βασίζεται σε χρονοδιακόπτη παρέχοντας αερισμό για 30 sec κάθε 20 min. Ο αερισμός αυτός σχεδιάστηκε για την παροχή αρκετού οξυγόνου για τη διατήρηση αερόβιας μικροβιακής ανάπτυξης. Η συνολική ροή αέρα στα δοχεία μετρείται με βαλβίδες και συγκεκριμένα το γεγονός του ανοίγματος και κλεισίματος τους που καταγράφεται.

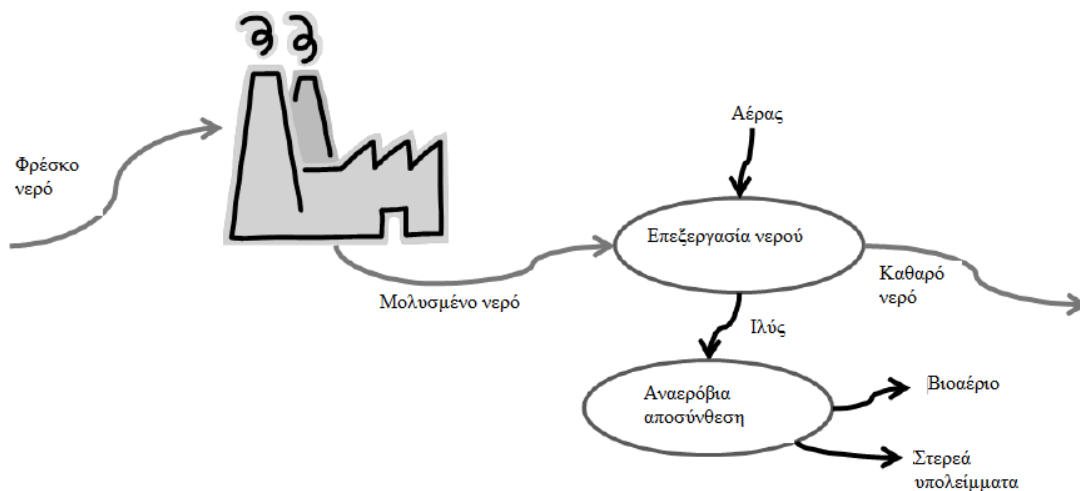
Βρέθηκε ότι το μίγμα είναι ευσταθές και αγρονομικά χρήσιμο προϊόν. Τα ακόλουθα είναι κάποια σημεία – κλειδιά:

- Το καλύτερο μίγμα από άποψης αποσύνθεσης ήταν 57% ιλύς, 25% άμμος, 6% φλοιός και 12% τέφρα. Είχε αρχική υγρασία 54% και λόγο C / N 412,7.
- Η πρόσθεση αζώτου μείωσε το C / N και αύξησε την ολική αποσύνθεση.

6.4.5 Αναερόβια χώνευση

Η αναερόβια αποσύνθεση στερεών αποβλήτων συνήθως εφαρμόζεται για να σταθεροποιηθεί η ιλύς, να μειωθεί ο όγκος και τουλάχιστον εν μέρει, να απολυμάνει τα απόβλητα πριν την απόρριψη τους. Πολλές από αυτές τις εγκαταστάσεις έχουν το επιπρόσθετο πλεονέκτημα ανάκτησης ενέργειας από την παραγωγή μεθανίου. Όμως, δεν υπάρχει πλήρης εγκατάσταση αναερόβιας αποσύνθεσης στον τομέα πολτού και χάρτου για την αποσύνθεση στερεών αποβλήτων. Στο Σχήμα 5.20 φαίνεται μία σχηματική ανακεφαλαίωση της διεργασίας.

Σχήμα 5.20. Σχηματική ανακεφαλαίωση παραγωγής ιλύος και παραγωγής βιοαερίου



Πηγή: Καπετάνιος Ευάγγελος, 2013

Στα τέλη του 1980 και στην αρχή του 1990, αρκετές έρευνες διεξήχθησαν για τη χρήση αναερόβιας αποσύνθεσης για την επεξεργασία στερεών αποβλήτων πολτού και χάρτου. Γενικά, τα αποτελέσματα από αυτές τις έρευνες έδειξαν ότι η αναερόβια αποσύνθεση βιοστερεών πολτού και χάρτου μειώνει τον όγκο κατά 30 – 70%, με το πλεονέκτημα παραγωγής μεθανίου. Όμως, τα υψηλά κόστη είναι οι λόγοι για την έλλειψη εγκαταστάσεων.

Γενικά, μόνο σχεδόν το μισό της οργανικής ύλης στο σύστημα ενεργούς ιλύος είναι ευαίσθητο στην αναερόβια βιοαποσύνθεση, με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση βιοαερίου. Η εναπομείνουσα μη αποδομήσιμη ύλη είναι είτε ανόργανος δεσμευμένος άνθρακας ή αργά αποδομήσιμες οργανικές ουσίες. Η πλειονότητα αναερόβιων χωνευτών χρησιμοποιεί μονής φάσης μεσοφιλικούς αντιδραστήρες. Η χρήση θερμοφιλικών χωνευτών έχει γίνει πιο ελκυστική λόγω ανώτερης απόδοσης, καλύτερης καταστροφής παθογόνων, και υψηλότερων ρυθμών αποσύνθεσης, που επιτρέπουν στις εγκαταστάσεις

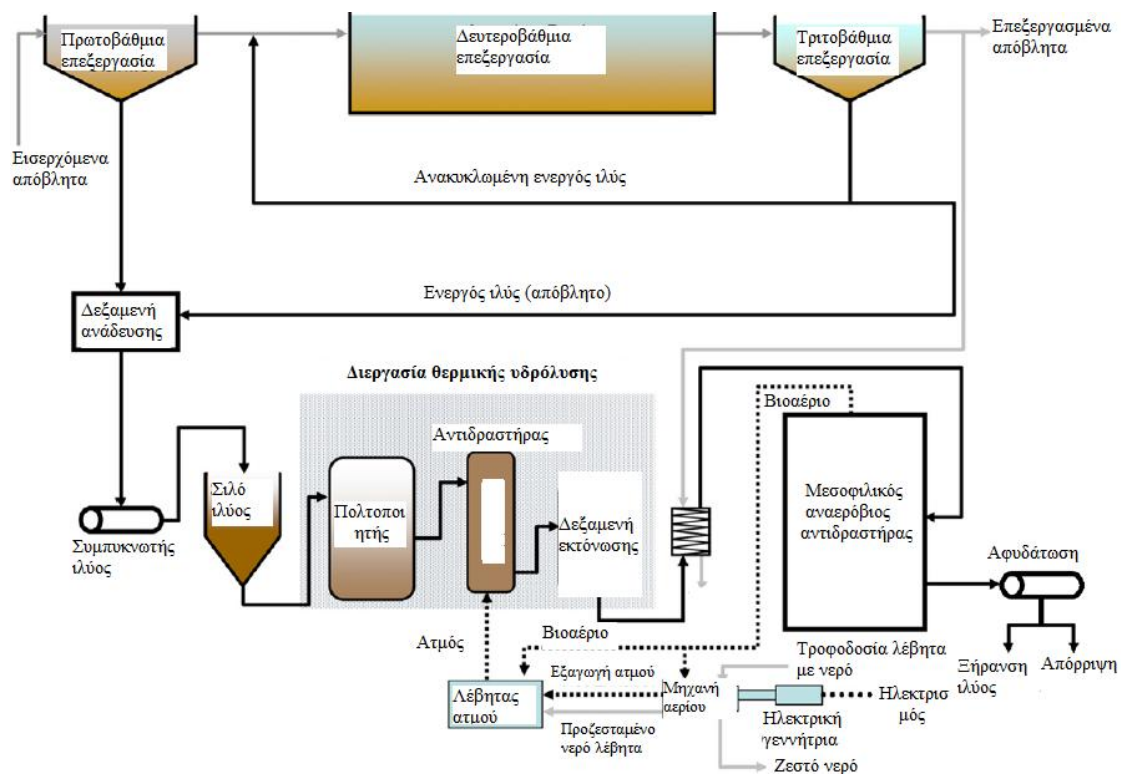
αναερόβια αποσύνθεσης να λειτουργούν σε υψηλότερους ρυθμούς φορτίου με μικρότερους όγκους αντιδραστήρων. Η θερμοφιλική αποσύνθεση μπορεί να μειώσει την ποσότητα οργανική ύλης που είναι πιο δύσκολο να αποδομηθεί, και έτσι βελτιώνει την αποτελεσματικότητα αφαίρεσης οργανικών ουσιών. Αρνητικά σημεία της θερμοφιλικής αποσύνθεσης περιλαμβάνουν αυξημένη προσοχή χειρισμού, πιθανότητα υψηλού επιπέδου οσμών, μεγαλύτερη ευαισθησία σε διαταραχές και χειρότερη ποιότητα φιλτραρίσματος.

Άλλη μία πρόσφατη τεχνολογική πρωτοβουλία που πιθανόν κάνει την αναερόβια αποσύνθεση εφικτή είναι η ανάπτυξη και εγκατάσταση προεπεξεργασίας ιλύος πριν την αναερόβια αποσύνθεση για να επιταχύνει την υδρόλυση της. Η προεπεξεργασία βελτιώνει την αποσύνθεση ιλύος και τον ρυθμό και ποιότητα του παραγόμενου βιοαερίου.

Στην έρευνα του Khanal με την χρήση υπερήχων, ο χωνευτής που παρέλαβε απόβλητα ενεργούς ιλύος με υπέρηχο αφαίρεση 11 – 39% περισσότερο ευδιάλυτο COD από όταν δεχόταν απόβλητα χωρίς υπέρηχηση. Η υπέρηχηση βελτίωσε την καταστροφή πτητικών στερεών στο 54%, και τα αποδομημένα βιοστερεά από τον υπερχητικό χωνευτή ήταν βιολογικά πιο ευσταθή.

Ο Jolis (2004) βρήκε ότι η θερμική υδρόλυση πρωτογενούς και δευτερογενούς ιλύος σε πολύ μεγάλη θερμοκρασία των 270 °C πριν την αποσύνθεση από αναερόβιο χωνευτή επιτρέπει υψηλότερο οργανικό φορτίο, αυξημένη καταστροφή πτητικών στερεών και την παραγωγή καυσίμου. Ο Ferrer (2006) βρήκε ότι η θερμική προεπεξεργασία με χαμηλή θερμοκρασία είναι πιο αποτελεσματική όσον αφορά την παραγωγή αερίου από θερμοφιλική αναερόβια αποσύνθεση σε σύγκριση με τις υψηλές θερμοκρασίες. Στο Σχήμα 5.21, η διεργασία ξεκινά έχοντας την παχύρευστη ιλύ από τα απόβλητα σε σιλό. Έπειτα, στέλνεται στο σταθμό υδρόλυσης, που αποτελείται από πολτοποιητή, αντιδραστήρα και μια δεξαμενή. Η επεξεργασμένη ιλύς κατευθύνεται στο χωνευτή. Το στάδιο της υδρόλυσης καθιστά την ιλύ πιο ευαίσθητη στην αποσύνθεση, και έτσι μειώνει τον όγκο του αναερόβιου χωνευτή στο μισό. Ως αποτέλεσμα της υδρόλυσης, η μείωση στερεών βελτιώνεται κατά 23%.

Σχήμα 5.21. Διεργασία θερμικής υδρόλυσης



Πηγή: Allan Elliot, 2007

Επίσης ο Πίνακας 5.3 κάνει μία σύγκριση των χαρακτηριστικών των αποβλήτων με την υδρόλυση και χωρίς αυτή, όπου σημαντικό κέρδος παρατηρείται λόγω της εγκατάστασης υδρόλυσης.

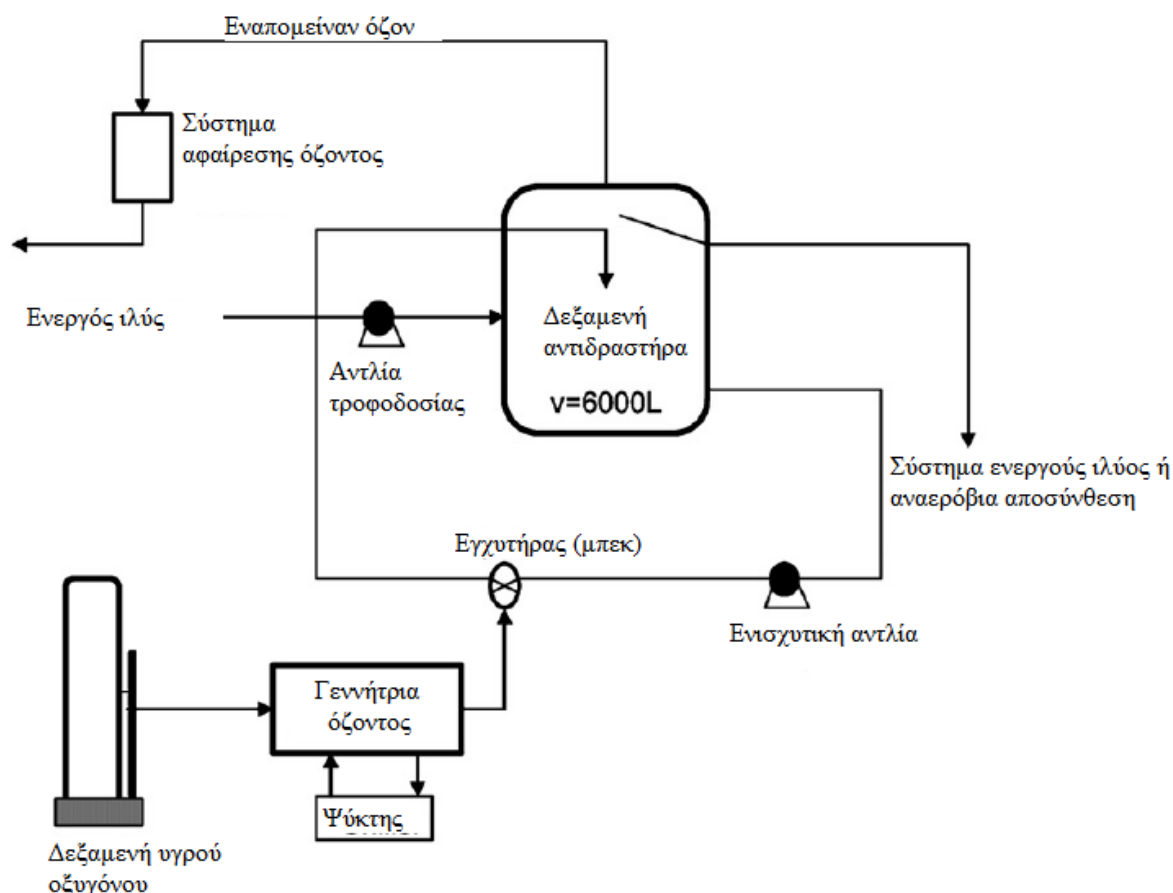
Πίνακας 5.3. Σύγκριση σεναρίων επεξεργασίας στερεών αποβλήτων με ή χωρίς τη θερμική υδρόλυση

Παράμετροι	Πριν την εγκατάσταση θερμικής υδρόλυσης	Μετά την εγκατάσταση θερμικής υδρόλυσης
Τροφοδοσία στερεών αποβλήτων (t/χρόνο)	7745	7745
Φορτίο COD (t / χρόνο)	9891	9891
Συνοχή ιλύος στον χωνευτή (%)	4	9
Ροή αποβλήτων (κυβ. μέτρ / ημέρα)	303	236
Λειτουργία μεσοφιλικού χωνευτή (ημέρες)	13	17
Συνοχή τελικής ιλύος (%)	24	30
Αφαιρούμενο COD (t / χρόνο)	3004 (30% μείωση)	6168 (63% μείωση)
Βιοαέριο (64% μεθάνιο) (Nm ³ /y)	1,008,238	3,188,528
Παραγόμενο βιοαέριο για αφαιρούμενο COD	541	517
Ετήσιο κόστος απόρριψης στερεών αποβλήτων (\$)	3,042,606	439,329

Πηγή: Allan Elliot, 2007

Το Σχήμα 5.22 είναι ένα διάγραμμα πλήρους μονάδας οζονισμού, η οποία χρησιμοποιείται ως μέθοδος προ - επεξεργασίας και σε συνδυασμό με την αναερόβια αποσύνθεση πετυχαίνει 19 – 35 % μείωση του όγκου ιλύος, ο ρυθμός της αποσύνθεσης μπορεί να φτάσει στο 65% και η παραγωγή μεθανίου φτάνει στο 30 – 40%. (Allan Elliot, 2007)

Σχήμα 5.22. Σχηματική διεργασία συστήματος οζονισμού



Πηγή: Allan Elliot, 2007

Η ομογενοποίηση υψηλής πίεσης εφαρμοζόμενη σε ιλύ πριν την αναερόβια αποσύνθεση μειώνει την παραγωγή της κατά 23% και αυξάνει την παραγωγή αερίου κατά 30%.

Τέλος, η αλκαλική προ - επεξεργασία σε συνδυασμό με την αναερόβια αποσύνθεση είναι αρκετά αποτελεσματική, αφού η παραγωγή αερίου αυξάνεται κατά 66%, 73% και 88% για θερμοκρασίες 25 °C, 35 °C και 55 °C αντίστοιχα.

6.4.6 Απόθεση στερεών αποβλήτων σε χωματερή

Για τη απόθεση των στερεών αποβλήτων που παράγονται από τις διεργασίες κατασκευής χαρτιού και τις διεργασίες επεξεργασίας λυμάτων σε χωματερή, αυτά τα απόβλητα πιέζονται ή υποβάλλονται σε φυγοκέντρηση για τη μείωση της ποσότητας του νερού, και έπειτα μεταφέρονται με φορτηγό στον τελικό τους προορισμό όπου εκκενώνονται. Η μεταφορά και η απόθεση αποτελεί ένα μεγάλο μέρος κόστους της συνολικής επεξεργασίας αποβλήτων (γύρω στο 75%). Αυτό συμβαίνει μερικώς επειδή, ακόμα και μετά την επίπλευση και την ξήρανση, τα στερεά απόβλητα έχουν ακόμα υψηλή περιεκτικότητα σε νερό. Θεωρώντας ότι η τιμή πετρελαίου αυξάνει συνεχώς, και οι κανονισμοί για τις εκπομπές άνθρακα και της χρήσης γης γίνονται όλο και πιο αυστηροί, προβλέπεται ότι το κόστος απόθεσης σε χωματερή θα αυξηθεί. Επιπλέον, αν ληφθεί υπόψη ότι η βιομάζα είναι μία πιθανή πηγή ενέργειας όπως το μεθάνιο (ή το βιοαέριο), που μπορεί να παραχθεί από αναερόβια αποσύνθεση, η μη χρησιμοποίηση της μπορεί να θεωρηθεί ως κόστος στη βιομηχανία που την παράγει.

6.4.6.1 Περιβαλλοντικός αντίκτυπος

Το μεθάνιο παράγεται στις χωματερές επειδή αναερόβιες συνθήκες δημιουργούνται καθώς τα απόβλητα εκκενώνονται με το κατάλληλο ποσό υγρασίας. Είναι 23 φορές πιο ισχυρό από το διοξείδιο του άνθρακα ως αέριο θερμοκηπίου, και υπό κανονικές συνθήκες, όντας ελαφρότερο από τον αέρα, χάνεται στην ατμόσφαιρα. Επομένως, η ανεξέλεγκτη εκπομπή μεθανίου από χωματερές είναι ένα σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα. Η πιθανότητα δημιουργίας ενός συστήματος που να παράγει μεθάνιο από στερεά απόβλητα όχι μόνο μειώνει τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της ανεξέλεγκτης εκπομπής ενός αερίου θερμοκηπίου, αλλά επίσης κάνει τα στερεά απόβλητα μία σημαντική ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

6.5 Μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

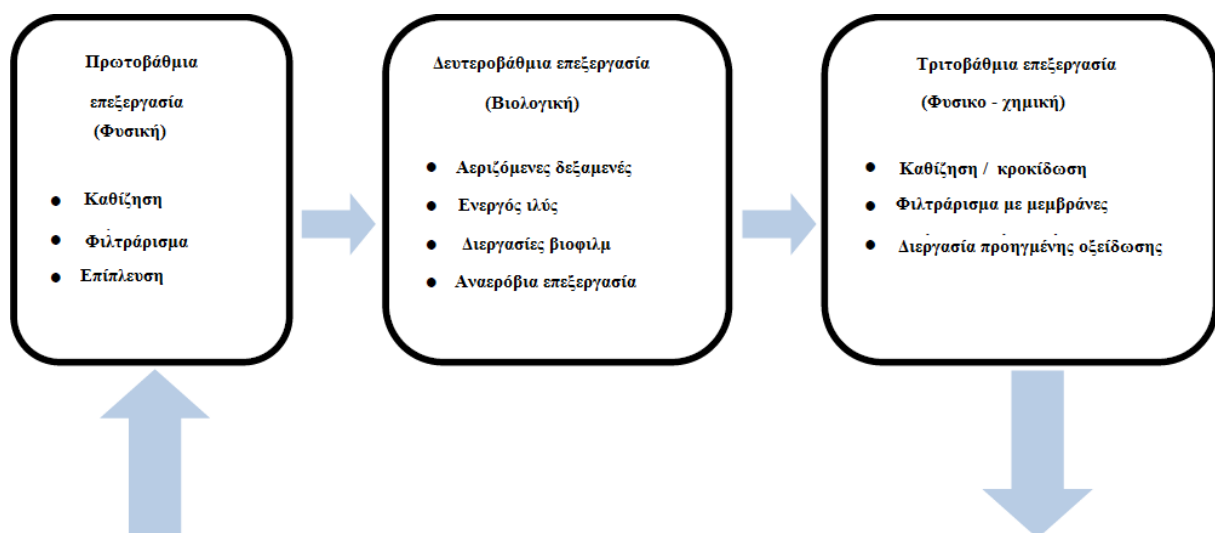
Αρκετά είδη ρύπων μπορούν να καταναμηθούν στο περιβάλλον μέσω των υγρών αποβλήτων, όπως λύματα από την προετοιμασία ξύλου, την έκλυση πολτού, τη λεύκανση πολτού και την κατασκευή χαρτιού, όπως επίσης και το μαύρο διάλυμα από τις δεξαμενές χώνευσης. Είναι φανερό πως τα υγρά απόβλητα από τις βιομηχανίες παραγωγής χάρτου, λόγω του υψηλού οργανικού φορτίου τους, του χρώματος τους και των ΑΟΧ που περιέχουν, είναι ιδιαίτερα τοξικά και η επεξεργασία τους αποτελεί επιτακτική ανάγκη. Ένα σύστημα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων περιλαμβάνει διάφορα στάδια επεξεργασίας και σχεδιάζεται με σκοπό να δεσμεύσει και να απομακρύνει από τα απόβλητα:

- το οργανικό φορτίο,
- τα αιωρούμενα (SS) και διαλυμένα (DS) στερεά,
- τα θρεπτικά άλατα (N και P),
- τους επικίνδυνους μικροοργανισμούς και
- διάφορους άλλους ρυπαντές.

Αυτό επιτυγχάνεται με συνδυασμό φυσικών, χημικών, φυσικοχημικών και βιολογικών διεργασιών.

Τα υγρά απόβλητα υπόκεινται τρία στάδια επεξεργασίας πριν εκκενωθούν. Οι διεργασίες που χρησιμοποιούνται διεθνώς για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων των εγκαταστάσεων παραγωγής χαρτομάζας, είναι συστήματα φυσικοχημικού καθαρισμού, βιολογικός καθαρισμός και συστήματα επεξεργασίας ιλύος (Σχήμα 5.23).

Σχήμα 5.23. Εξωτερική επεξεργασία υγρών αποβλήτων σε στάδια



Πηγή: Allan Elliot, 2007

Η πρωτοβάθμια επεξεργασία αφαιρεί τα αιωρούμενα σωματίδια από τα απόβλητα και αυτό που απομένει είναι σωματίδια φλοιού, ίνες ενισχυτικά και υλικά επικάλυψης με την μορφή ιλύος, και γενικά περιλαμβάνει αφαίρεση άμμου, κοσκίνισμα, άλεση και καθίζηση. Η ιλύς έπειτα είτε θεωρείται στερεό απόβλητο και αποτεφρώνεται ή χρησιμοποιούνται βιολογικές διεργασίες για την αποσύνθεσή της.

Αυτές οι διεργασίες αποτελούν τα συστήματα δευτεροβάθμιας επεξεργασίας, που χρησιμοποιούν οργανισμούς για να μετατρέψουν την διαλυμένη οργανική ύλη σε πιο αβλαβή μορφή. Παρόλο που αρχικά σχεδιάστηκαν για την μείωση του BOD, η δευτεροβάθμια επεξεργασία επίσης μειώνει το COD και τις χλωριωμένες ενώσεις. Και αυτή, όμως, η επεξεργασία επίσης παράγει ιλύ, που αποτελείται κυρίως από τα οργανικά υπολείμματα των βακτηρίων. Αυτό το προϊόν οδηγείται για αποτέφρωση, στη χωματερή ή για ωφέλιμη χρήση.

Με βιολογική επεξεργασία των αποβλήτων με συστήματα όπως δεξαμενές αερισμού, χημικής κατακρήμνισης, ενεργού ιλύος και αναερόβιας αποσύνθεσης, το BOD μπορεί να μειωθεί κατά 99% και το COD κατά 50 – 90%. Ο Tezel (2003) με ένα βιολογικό σύστημα διαδοχικής αναερόβιας επεξεργασίας πέτυχε μείωση του COD κατά 91% και των ενώσεων AOX κατά 58%.

Υπάρχει και η τριτοβάθμια επεξεργασία στην οποία περιλαμβάνονται προηγμένες βιολογικές μέθοδοι αφαίρεσης αζώτου και χημικές και φυσικές μέθοδοι όπως κοκκώδες φιλτράρισμα.

Πολλές φυσικές και χημικές διεργασίες έχουν μελετηθεί εκτεταμένα για την απομάκρυνση του χρώματος από τα απόβλητα των μονάδων παραγωγής χάρτου. Τέτοιες είναι η μέθοδος του γρήγορου φιλτραρίσματος μέσω του εδάφους, το υπερφιλτράρισμα (ultra filtration), η χρωματογραφία ιοντοανταλλαγής, η αντικατάσταση του χλωρίου με υποχλωριούχες ενώσεις, χρήση ενεργού άνθρακα κ.α. Οι διεργασίες αυτού του τύπου είναι οικονομικά ασύμφορες και δύσκολα εφαρμόζονται. Έτσι, πολλοί επιστήμονες στράφηκαν προς άλλες τεχνικές, όπως η χρήση καλλιεργειών με βακτήρια, μύκητες και άλη για την απομάκρυνση του χρώματος από τα απόβλητα. Για τις βακτηριδιακές καλλιέργειες έχουν χρησιμοποιηθεί τα βακτήρια *Pseudomonas ovalis* και *Pseudomonas aeruginosa*. Το τελευταίο μείωσε το χρώμα κατά 26 - 54%. Στις καλλιέργειες αλγών χρησιμοποιείται το *Microcystis* sp., ενώ για τις καλλιέργειες μυκήτων τα είδη *Aspergillus niger*, *Trametes versicolor*, *Phaenerochaete chrysosporium* κ.α.

Η πλειονότητα των οργανοχλωριωμένων ενώσεων που υπάρχουν στα απόβλητα των χαρτοπαραγωγικών μονάδων είναι χλωρολιγνίνες υψηλού μοριακού βάρους. Οι ενώσεις αυτές είναι βιολογικά αδρανείς και έχουν μικρή συνεισφορά στην τοξικότητα και το οργανικό φορτίο των αποβλήτων. Εν τούτοις, είναι δύσκολο να αποδομηθούν, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής και δύσκολα απομακρύνονται με τη συμβατική πρωτοβάθμια και δευτεροβάθμια επεξεργασία των αποβλήτων. Αντίθετα, αφενός οι χαμηλού βάρους χλωριωμένες ενώσεις (και χλωρολιγνίνες) συνεισφέρουν περισσότερο στην τοξικότητα, αφετέρου βιοσυσσωρεύονται έντονα, επειδή είναι λιπόφιλες ενώσεις και διαπερνούν τις κυτταρικές μεμβράνες. Ο Stuthridge (1994) μελέτησε ένα σύστημα δεξαμενής αερισμού σε μια μονάδα παραγωγής χάρτου στη Νέα Ζηλανδία και παρατήρησε μείωση των οργανοχλωριωμένων ενώσεων κατά 65%.

Προτείνεται η χρήση αναερόβιων βακτηρίων ως ένας πολύ καλός τρόπος για την αποαλογόνωση πολυχλωριωμένων φαινολών. Με αναερόβια επεξεργασία αποβλήτων μιας μονάδα παραγωγής χάρτου επιτεύχθηκε μείωση του BOD και του COD κατά 80 – 90% και 30% αντίστοιχα. Αν στα απόβλητα αυτά προηγηθεί μια αερόβια επεξεργασία, τότε η μείωση του COD θα φτάσει το 50%. Ο Lacorte (2003) σημειώνει ότι ο συνδυασμός βιολογικής επεξεργασίας αποβλήτων με ένα σύστημα μεμβρανών παρουσίασε ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Στη μελέτη συνδυασμού αναερόβιας επεξεργασίας και φιλτραρίσματος παρατήρησε ότι η βιολογική επεξεργασία των αποβλήτων βελτίωσε την απόδοση του φιλτραρίσματος. Πάντως, αν και ο συνδυασμός βιολογικής επεξεργασίας με συστήματα υπερφιλτραρίσματος ή νανοφιλτραρίσματος (nanofiltration) παρουσιάζουν μία καλύτερη τεχνική για την κατακράτηση ρυπαντικού φορτίου, δεν παύουν να αποτελούν μία υψηλού κόστους λύση.

Τα τελευταία χρόνια υιοθετούνται αναβαθμισμένα υβριδικά συστήματα που συνδυάζουν τα οφέλη και τα πλεονεκτήματα από δύο ή περισσότερες διεργασίες. Για παράδειγμα, ο συνδυασμός θρόμβωσης και υγρής οξειδωσης (wet oxidation) απομάκρυνε 51% COD, 83% χρώματος και 75% λιγνίνης. Τέλος, επισημαίνεται ότι ο συνδυασμός επίπλευσης με διαλυμένο αέρα (dissolved air flotation) και χημικής κατακρήμνισης (chemical precipitation) απομάκρυνε 93% από τα αιωρούμενα στερεά, 50% BOD, 57% COD, 92% φωσφόρου και 52% αζώτου.

Στον Πίνακα 5.4 παρουσιάζονται διάφορα είδη (στάδια) επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων.

Πίνακας 5.4. Τα διάφορα στάδια της επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων

Είδος επεξεργασίας υγρών αποβλήτων			
Μηχανική	Χημική	Βιολογική	Φυσικοχημική
<p>Επιτυγχάνεται με μηχανικά μέσα. <u>Περιλαμβάνει:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Σχάρες - Τεμαχιστές - Κόσκινα - Αμμοσυλλέκτες - Λιποσυλλέκτες - Δεξαμενές καθίζησης - Διύλιστρία 	<p>Διάφορα χημικά αντιδραστήρια/ αναμιγνύονται με τα υγρά απόβλητα προκειμένου να γίνει κάποια χημική αντίδραση. <u>Περιλαμβάνει:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Δεξαμενές ανάμιξης αντιδραστηρίων - Συσκευές δοσομέτρησης αντιδραστηρίων 	<p>Συνίσταται στη βιοχημική οξείδωση των διαλυμένων στα υγρά απόβλητα οργανικών ενώσεων. <u>Περιλαμβάνει:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Δεξαμενές βιολογικής επεξεργασίας - Δεξαμενές καθίζησης 	<p>Γίνεται εκμετάλλευση ορισμένων φυσικοχημικών ιδιοτήτων των διαφόρων ενώσεων των υγρών αποβλήτων. <u>Περιλαμβάνει:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Αντιδραστήρες ενεργού άνθρακα - Εναλλάκτες ιόντων - Δεξαμενές αντίστροφης ώσμωσης

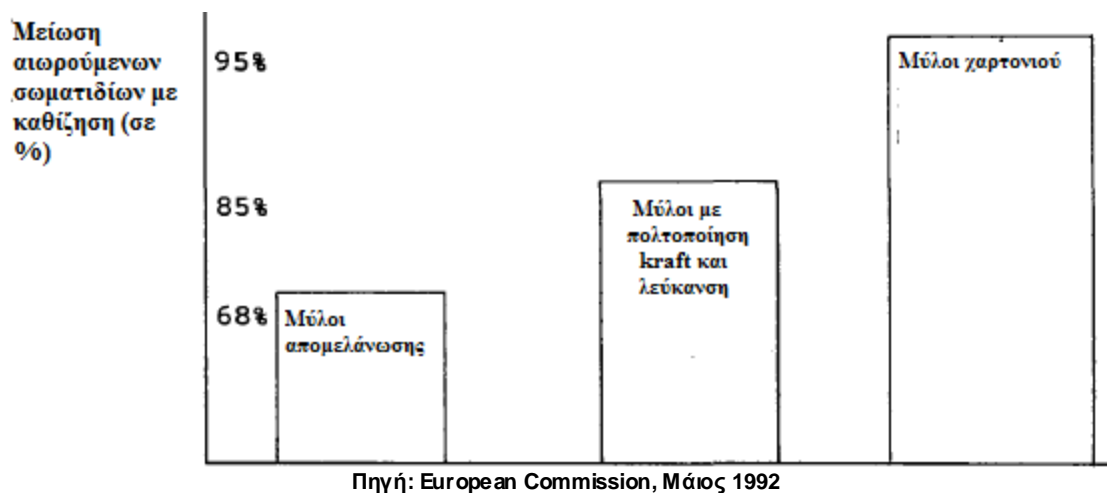
Πηγή: Ευθύμιος Νταρακάς, 2006

6.5.1 Συστήματα φυσικού καθαρισμού

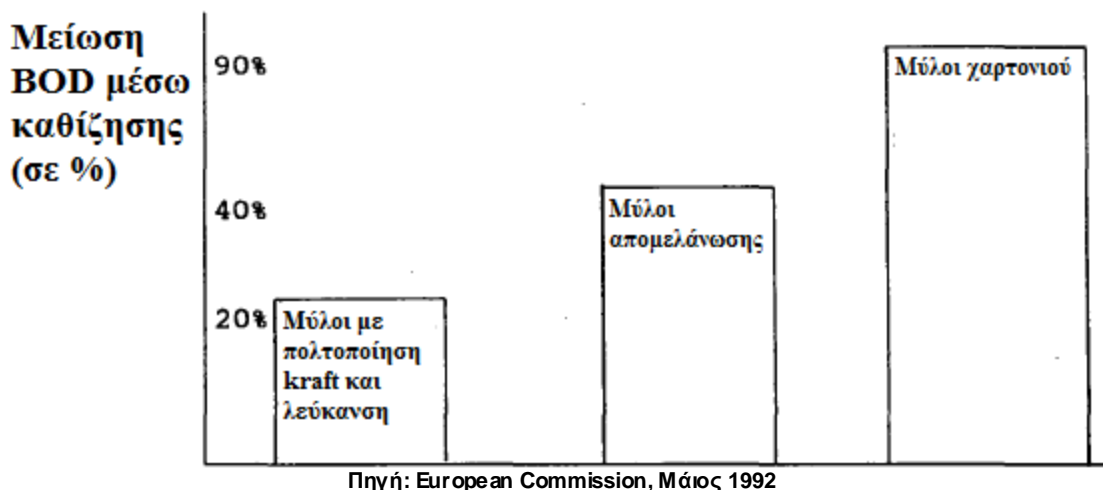
Τα συστήματα φυσικού καθαρισμού χρησιμοποιούνται ως αυτοτελή συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων, ενσωματωμένα στην παραγωγική διαδικασία, όταν αποσκοπούν στην ανάκτηση υδάτων ή υλικών. Χρησιμοποιούνται ακόμα αυτοτελώς, όταν δεν απαιτείται η διασφάλιση υψηλού βαθμού απορρύπανσης, ή ως στάδια για τη μείωση των φορτίων που καταλήγουν σε διατάξεις βιολογικής επεξεργασίας ή προέρχονται από αυτές (πρωτογενής ή τριτογενής καθαρισμός). Επίσης, χρησιμοποιούνται και ως διατάξεις επεξεργασίας παραπροϊόντων από την επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Οι διηθήσεις εξασφαλίζονται με τη διέλευση των υγρών αποβλήτων από διηθητικές επιφάνειες, με ικανότητα κατακράτησης σωματίων με διάμετρο μεγαλύτερη των 600 μm.

Χρησιμοποιούνται συνήθως, μηχανοκίνητες διατάξεις, αποτελούμενες από περιστρεφόμενες διηθητικές επιφάνειες, εφοδιασμένες με μηχανισμούς αφαίρεσης και απομάκρυνσης των στερεών που συγκρατούνται. Τα εσχαρίσματα συλλέγονται και απομακρύνονται ή επαναφέρονται στην παραγωγή με υδραυλικά δίκτυα. Για το διαχωρισμό ευμεγεθών αιωρούμενων στερεών (ίνες) και βαρέων σωματιδίων γεωλογικής ή άλλης προέλευσης, χρησιμοποιούνται οι κλασικές δεξαμενές καθίζησης, συνήθως κυκλικής διατομής με πυθμένα, μορφής ανεστραμμένου κώνου και ιδίως διατάξεις που επιτρέπουν το διαχωρισμό των στερεών αυτών σε συνθήκες περιστροφικής ροής της εισερχόμενης παροχής (υδροκυκλώνες). Επίσης, σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και διατάξεις μηχανικής φυγοκέντρισης. Ακόμα, χρησιμοποιούνται διατάξεις θρόμβωσης - συσσωμάτωσης και επίπλευσης όλων των τύπων. Τα συστήματα διάγνωσης λειτουργούν αποδοτικότερα όταν εξασφαλίζεται η συνένωση των σωματιδίων σε θρόμβους, έτσι ώστε να μεγαλώσουν οι διαστάσεις. Η θρόμβωση επιτυγχάνεται με προσθήκες στα υγρά απόβλητα κροκιδωτικών ουσιών. Τα συστήματα φυσικοχημικής επεξεργασίας εξασφαλίζουν απομάκρυνση των στερεών, ως SS, της τάξης του 90 – 95 % (Σχήμα 5.24), μείωση των οργανικών ενώσεων, ως BOD, της τάξης του 25 % και αμελητέα μείωση των διαλυμένων ενώσεων (Σχήμα 5.25). (European Commission, Μάιος 1992)

Σχήμα 5.24. Ποσοστό μείωσης των συνολικά αιωρούμενων σωματιδίων μέσω καθίζησης



Σχήμα 5.25. Μείωση BOD μέσω καθίζησης



6.5.1.1 Καθίζηση

Η καθίζηση είναι η πιο συχνή μέθοδος διαχωρισμού στερεών μορίων από την υγρή φάση. Μόρια που έχουν υψηλότερη πυκνότητα από το περιβάλλον υγρό καθιζάνουν και συσσωρεύονται στον πυθμένα ως ιλύς. Η καθίζηση συχνά γίνεται σε μεγάλες ορθογώνιες ή κυκλικές λεκάνες.

6.5.1.2 Επίπλευση

Οι τυπικές εγκαταστάσεις επίπλευσης που χρησιμοποιούνται στην χαρτοποιία βασίζονται στην εκτόνωση στην υγρή μάζα υπέρκορου σε αέρα ύδατος. Ο υπερκορεσμός του ύδατος σε αέρα εξασφαλίζεται σε πιεστικό θάλαμο, με παροχή ίση προς το 15 – 30 % της παροχής που διέρχεται από το διαυγαστήρα. Οι φυσαλίδες οδεύουν προς τα πάνω συμπαρασύροντας το αιώρημα. Το αιώρημα σχηματίζει επίταγο που απάγεται με επιφανειακό αποξεστήρα προς τη δεξαμενή συγκέντρωσης επίταγου. Το καθαρισμένο νερό απομακρύνεται συνήθως από τα 2/3 του ύψους της δεξαμενής επίπλευσης με σιφονισμό. Τα επιπλέοντα υλικά που απομακρύνονται ως επίταγος, δεν μπορούν να διατεθούν σε τελικούς αποδέκτες χωρίς επεξεργασία, μπορούν όμως, στην περίπτωση της παραγωγής χαρτιού συσκευασίας, να ανακυκλωθούν στην παραγωγή. Τα στερεά που διαχωρίζονται, ως ένυδρα

ιζήματα ή ως επίταγος στην περίπτωση των επιπλεύσεων απομακρύνονται με άντληση και οδηγούνται σε διατάξεις που εξασφαλίζουν τη σταθεροποίησή τους.

6.5.2 Συστήματα βιολογικού καθαρισμού

Τα συστήματα βιολογικού καθαρισμού χρησιμοποιούνται ως αυτοτελή συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων και ως διατάξεις επεξεργασίας παραπροϊόντων από την επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Η βιολογική επεξεργασία απαιτεί σύστημα διατάξεων αποτελούμενο από σειρά βιολογικών αντιδραστήρων και διαυγαστήρων. Οι βιολογικοί αντιδραστήρες είναι συνήθως δεξαμενές, που διασφαλίζουν τη διέλευση των υγρών αποβλήτων με ταυτόχρονη διατήρηση βιομάζας, αποτελούμενη από ιθαγενείς του νερού αερόβιους ή αναερόβιους οργανισμούς. Η βέλτιστη τεχνικοοικονομικά λύση για την επεξεργασία των αποβλήτων από τις εγκαταστάσεις παραγωγής χαρτομάζας είναι η κατασκευή αερόβιων εγκαταστάσεων βιολογικού καθαρισμού πολύ χαμηλής φόρτισης, διότι δεν απαιτεί την κατανάλωση ενέργειας, ενώ το κόστος των εγκαταστάσεων προέρχεται αποκλειστικά από την αξία των γηπέδων. Ακολουθεί ο συνδυασμός αερόβιας επεξεργασίας σε συνθήκες πολύ υψηλής φόρτισης με αναερόβια επεξεργασία. Η κατανάλωση ενέργειας για την αναερόβια επεξεργασία είναι της τάξης των 10 - 14 kWh/tn χαρτομάζας. Η κατανάλωση αυτή αντισταθμίζεται από την παραγωγή βιοαερίου και προκύπτει όφελος επιπλέον 15 - 20 kWh/tn χαρτομάζας, από την καύση του. Μειονέκτημα του συνδυασμού αυτού είναι το υψηλό κόστος κατασκευής των αναερόβιων αντιδραστήρων. Η πλέον ασύμφορη ενεργειακά λύση είναι οι αντιδραστήρες χαμηλής φόρτισης της βιομάζας, όπου η κατανάλωση ενέργειας είναι της τάξης των 25 - 35 kWh/tn χαρτομάζας.

6.5.2.1 Επεξεργασία ιλύος

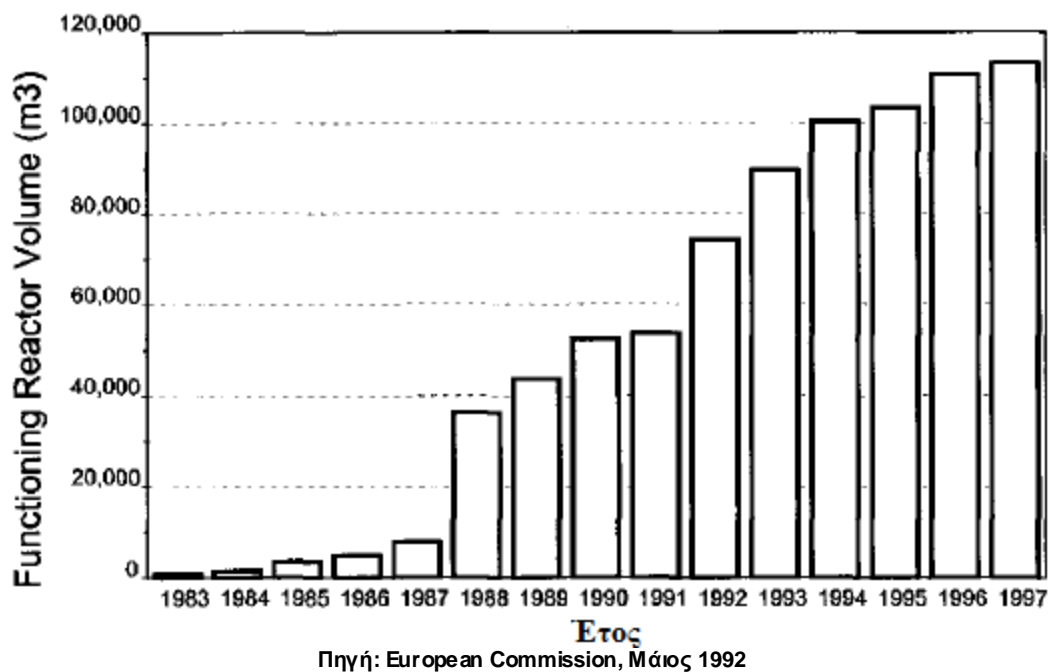
Η σταθεροποίηση των παραπροϊόντων καθαρισμού γίνεται χημικά ή βιολογικά. Η χημική σταθεροποίηση επιτυγχάνεται με χημικές αντιδράσεις συνήθως οξείδωσης ή αναγωγής που αποσκοπούν στη δημιουργία αδιάλυτων ενώσεων που μπορούν να θρομβωθούν και στη συνέχεια να διαχωριστούν με διαδικασίες διαύγασης. Οι διατάξεις χημικής σταθεροποίησης είναι ίδιες με αυτές για τις θρομβώσεις (κροκίδωση, συσσωμάτωση, διαύγαση). Η βιολογική σταθεροποίηση επιτυγχάνεται με την αυτόλυση των κυττάρων που αποτελούν τη βιομάζα. Επιτυγχάνεται σε διατάξεις που διασφαλίζουν χρόνο παραμονής των ιζημάτων ή του επίταγος, σε βιολογικό αντιδραστήρα. Τα σταθεροποιημένα παραπροϊόντα αφυδατώνονται, στη συνέχεια, σε διατάξεις συμπίεσης (φιλτρόπρεςες) ή υπό την επίδραση ατμοσφαιρικών παραγόντων. Η πλέον αποδοτική ενεργειακά αφυδάτωση είναι σε κλίνες ξήρανσης, όπου δεν καταναλώνεται ενέργεια, εκτός από τις αντλήσεις για τη μεταφορά και διάστρωση των ιζημάτων, ενώ η πλέον ενεργοβόρος είναι η μηχανική αφυδάτωση.

6.5.2.2 Αναερόβια αποσύνθεση λυμάτων σταθμού χαρτιού

Μία ευρεία ποικιλία λυμάτων βιομηχανίας δασοκομίας παράγονται. Τα πιο σημαντικά όσον αφορά την ποσότητα και το φορτίο ρύπανσης είναι τα ποικίλα διαλύματα πολτοποίησης και λεύκανσης. Αυτά κατηγοριοποιούνται με τις μεθόδους πολτοποίησης που χρησιμοποιούνται και κυμαίνονται από λύματα μηχανικής πολτοποίησης, στα οποία μόνο ένα μικρό κλάσμα (2 - 7%) του ξύλου χάνεται στην πολτοποίηση, μέχρι τα λύματα χημικής πολτοποίησης όπου ένα σημαντικό κλάσμα (45 - 50%) του ξύλου διαλύεται. Παραδοσιακά τα συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων αποτελούνται από ένα πρωτοβάθμιο βήμα αφαίρεσης αιωρούμενων στερεών ακολουθούμενο από αερόβια επεξεργασία με δεξαμενές αερισμού. Όμως, τα λύματα σταθμού χαρτιού περιέχουν σύνθετες οργανικές ουσίες που δεν μπορούν να επεξεργαστούν πλήρως χρησιμοποιώντας συμβατικές τεχνικές, όπως είναι οι αερόβιες

διεργασίες, οι οποίες φέρουν και σχετικά υψηλά κόστη λειτουργίας. Σαν αποτέλεσμα, η αναερόβια τεχνολογία είναι μία υποσχόμενη εναλλακτική για την επεξεργασία των λυμάτων λόγω της ικανότητας της να διασπά δύσκολες οργανικές ενώσεις. Η εγκατάσταση μεγάλης κλίμακας αναερόβιων συστημάτων χώνευσης για τα λύματα πολτού και χάρτου αυξάνεται από το 1983 (Σχήμα 5.26).

Σχήμα 5.26. Αριθμός λειτουργικών αναερόβιων αντιδραστήρων στη βιομηχανία πολτού και χάρτου



Ο αντιδραστήρας ανοδικής ροής αναερόβιου στρώματος ιλύος, ο αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης και το αναερόβιο φίλτρο είναι οι αναερόβιες μέθοδοι που χρησιμοποιούνται πιο συχνά.

6.5.2.2.1 Εισαγωγή στην αναερόβια αποσύνθεση

Η αναερόβια αποσύνθεση είναι μία επεξεργασία αποβλήτων ευρέως χρησιμοποιούμενη για μια ποικιλία δημοτικών και βιομηχανικών αποβλήτων και βασίζεται στη ζύμωση οργανικών ενώσεων σε μεθάνιο. Αυτή η ζύμωση παίζει σημαντικό ρόλο στην ανακύκλωση οργανικής ύλης στη φύση. Κατά τη διάρκεια αυτής της διεργασίας, η οργανική ύλη αποδομείται σε μεθάνιο και διοξείδιο το άνθρακα από μία διασυνδεδεμένη ακολουθία χημικών διαδρομών. Οι αναερόβιες διεργασίες επεξεργασίας είναι πιο κατάλληλες για επεξεργασία λυμάτων υψηλής αντοχής. Αυτό το δίκτυο συνδεδεμένων διαδρομών και ομάδων βακτηρίων, και το τελικό προϊόν, το μεθάνιο, είναι υπεύθυνα για πολλά από τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της αναερόβιας αποσύνθεσης σε σχέση με την αερόβια. Θεωρήθηκε ότι η χρήσης αυτών των αναερόβιων διαδρομών μπορεί να επιτρέψει την αποσύνθεση των ενώσεων των λυμάτων πολτοποίησης που ήταν κοινώς αποδομημένα όταν επεξεργάστηκαν αερόβια.

Το μεθάνιο διατηρεί 90% της ενέργειας και εύκολα διαχωρίζεται από τα απόβλητα με αποτέλεσμα να είναι χρήσιμη πηγή ενέργειας. Μόνο ένα μικρό μέρος της παραγόμενης ενέργειας χρησιμοποιείται από τις διάφορες κυτταρικές ομάδες βακτηρίων που πρέπει να μοιραστούν την ενέργεια κατά μήκος της συγκεκριμένης διαδρομής που χρησιμοποιείται. Ο αριθμός των διαδρομών που διατίθενται για αναερόβια αποσύνθεση συχνά σημαίνει ότι οι ενώσεις όπως χλωριωμένες οργανικές που δεν αποδομούνται αποτελεσματικά αερόβια, αποσυντίθενται αναερόβια. Τα πλεονεκτήματα που αναφέρονται είναι:

- Δεν υπάρχουν απαιτήσεις αερισμού με αποτέλεσμα χαμηλή παροχή ενέργειας.
- Είναι πιθανές μεγάλες αδρανείς περιόδους.
- Πολύ υψηλές συγκεντρώσεις κυττάρων μπορούν να επιτευχθούν εξαρτώμενες από τον τύπο αντιδραστήρα.

Τα μειονεκτήματα είναι τα παρακάτω:

- Γενικά δεν θεωρείται μία πλήρης μέθοδος, για παράδειγμα, ένα περαιτέρω αερόβιο βήμα συχνά απαιτείται.
- Ευαισθησία σε κάποιες ανασταλτικές ενώσεις.
Ένα καλά διαχειριζόμενο σύστημα αναερόβιας αποσύνθεσης έχει την δυνατότητα μέγιστης παραγωγής μεθανίου και δεν απελευθερώνει αέρια στην ατμόσφαιρα. Αυτό το σύστημα επίσης παρέχει μία πηγή ενέργειας χωρίς αύξηση στον ατμοσφαιρικό άνθρακα που συνεισφέρει στην αλλαγή κλίματος. Η παραγόμενη ενέργεια μέσω της αναερόβιας αποσύνθεσης μπορεί να βοηθήσει στη μείωση ζήτησης ορυκτών καυσίμων.
- Η βιομηχανία πολτού και χάρτου απαιτεί πολύ νερό και μπορεί να καταναλώσει μέχρι 60 m^3 νερού για έναν τόνο παραγόμενου χαρτιού. Τα λύματα του σταθμού χαρτιού περιέχουν σύνθετη οργανική ύλη και αν αυτές οι ενώσεις δεν αφαιρούνται με επεξεργασία εντός χώρου παραγωγής, εκκενώνονται σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων. Συνήθως η αναερόβια επεξεργασία δεν χρησιμοποιείται.

Γενικά, η παραγωγή λυμάτων και τα χαρακτηριστικά των αποβλήτων από σταθμούς πολτού και χαρτιού εξαρτώνται από το είδος παραγωγικής διαδικασίας που υιοθετείται. Έτσι, η επεξεργασία των λυμάτων από διαφορετικούς σταθμούς γίνεται πολύπλοκη επειδή δεν γίνεται δύο διαφορετικοί σταθμοί να απορρίπτουν πανομοιότυπα απόβλητα.

Τα λύματα σταθμών πολτού και χάρτου θεωρούνται ως τα πιο μολυσματικά υπολείμματα. Η πρωταρχική πηγή ινών που χρησιμοποιείται στους σταθμούς αυτούς είναι το ξύλο. Κύρια συστατικά του ξύλου είναι η κυτταρίνη, η ημικυτταρίνη, η λιγνίνη και άλλες ουσίες που είναι δύσκολο να βιοδιασπαστούν. Τα λύματα παράγονται από προετοιμασία ξύλου, διεργασία πολτοποίησης, πλύση πολτού, φιλτράρισμα, πλύση, λεύκανση και λειτουργίες χαρτομηχανής.

Για την καλύτερη κατανόηση της εξάλειψης των οργανικών ουσιών σε όρους των γενικά χρησιμοποιούμενων παραμέτρων BOD και COD, είναι απαραίτητο να παρουσιαστεί το ακριβές νόημα αυτών των όρων. Και οι δύο ποσοτικοποιούν συγκεκριμένα αποτελέσματα (κατανάλωση οξυγόνου που προκαλείται από βακτηριακή δραστηριότητα στην περίπτωση του BOD, χρωμική μείωση που προκαλείται από χημική οξείδωση στην περίπτωση του COD), που χρησιμοποιούνται ως ποσότητες ουσιών (συγκέντρωση, φορτίο). Όμως, όταν αναφέρεται ότι ένα δείγμα νερού έχει $100 \text{ mg} / \text{l BOD}$, σημαίνει ότι η οργανική ύλη στο νερό χρειάζεται 100 mg οξυγόνο ανά λίτρο για να αποσυντεθούν βιοχημικά.

Το λύμα που παράγεται από την πολτοποίηση ονομάζεται μαύρο διάλυμα, και είναι το πιο μολυσματικό παραπροϊόν στους σταθμούς πολτού και χάρτου. Είναι σκούρο στο χρώμα με υψηλό pH, BOD, COD και αιωρούμενα στερεά.

Γενικά, το μαύρο διάλυμα καίγεται σε συμβατικούς λέβητες για την ανάκτηση χημικών ουσιών πολτοποίησης και την παραγωγή ενέργειας βιομάζας. Η αεριοποίηση του μαύρου διαλύματος είναι μία υποσχόμενη εναλλακτική για ανάκτηση ενέργειας και χημικών ουσιών, επειδή το οργανικό κλάσμα του μαύρου διαλύματος προέρχεται από βιομάζα. Επιπλέον, τα λύματα αποτελούν μία σημαντική πηγή υδάτινης ρύπανσης αφού περιέχουν ρητινικά οξέα, χλωριωμένες οργανικές ουσίες αιωρούμενα στερεά, μέταλλα, λιπαρά οξέα, τανίνες, λιγνίνη κτλ.

Η αναερόβια αποσύνθεση του μαύρου διαλύματος πετυχαίνει 55% μείωση COD σε ρυθμό μέγιστου οργανικού φορτίου των 8 kg COD/m³ ημέρα. Η παραγωγή βιοαερίου και μεθανίου είναι ήταν 11 m³/ ημέρα και 71% αντιστοίχως. Αναερόβια – αερόβια επεξεργασία του διαλύματος προκάλεσε 72% μείωση του COD και 97% BOD.

6.5.2.2.2 Αναερόβια βιοαποδομησιμότητα λυμάτων

Η αναερόβια βιοαποδομησιμότητα των λυμάτων αναφέρεται ως υψηλή (30 – 60% ολικού COD) και η τοξικότητα χαμηλή. Οι υδατάνθρακες και λιγνίνη αναφέρονται στα ίδια ποσοστά στα απόβλητα όπως βρίσκονται στο ξύλο. Σε ξερό ξύλο, οι υδατάνθρακες και η λιγνίνη βρίσκονται σε 71% και 27% αντίστοιχα. Η χαμηλού μοριακού βάρους λιγνίνη αποδομείται αναερόβια σταδιακά. Η ελεύθερη κυτταρίνη και ημικυτταρίνη αναμένονται να αποδομηθούν αλλά περιορισμένα λόγω του ρυθμού σακχαροποίησης. Οι λιγνοκυτταρικές μονάδες που δεν διαχωρίζονται στην πολτοποίηση αποδομούνται μερικώς και τα λιπαρά οξέα μακριάς αλυσίδας αποδομούνται επίσης. Τα ρητινικά οξέα και οι σχετιζόμενες αλκοόλες, που αντιπροσωπεύουν τις υπόλοιπες ουσίες, αναφέρονται ως ανθεκτικές στην αναερόβια επεξεργασία.

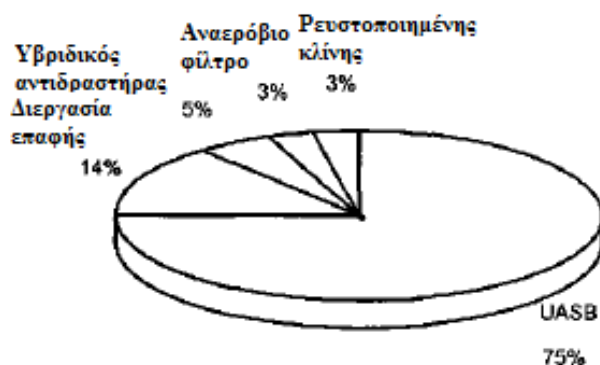
Η καλή αφαίρεση από αιωρούμενα σωματίδια είναι υποχρεωτική για την καλή απόδοση αναερόβιας αποσύνθεσης λόγω της επιρροής τους στην ικανότητα καθίζησης της ιλύος, στον όγκο κλίνης του αντιδραστήρα και στη ροή μέσα σε αυτόν.

Οι Rintala και Lepisto (1992) επεξεργάστηκαν τα υγρά απόβλητα χρησιμοποιώντας UASB αντιδραστήρα σε διαφορετικές θερμοκρασίες και πήραν αποτελεσματικότητα μείωσης COD 82%, 92% και 86% σε 35 °C, 55 °C και 65 °C, αντίστοιχα. Επίσης, συμπέραναν ότι η μείωση των υδατανθράκων και πτητικών λιπαρών οξέων ήταν 50 – 60% εφαρμόζοντας μία αναερόβια διεργασία ενεργούς ιλύος μετά τον UASB αντιδραστήρα.

Οι Ortega – Clemente και Poggi – Varaldo (2007) επεξεργάστηκαν αναερόβια το μαύρο διάλυμα που προκύπτει από την πολτοποίηση, χρησιμοποιώντας αντιδραστήρα σταθερής και ρευστοποιημένης κλίνης.

Από τα διάφορα σχέδια αναερόβιων αντιδραστήρων που διατίθενται, ο αντιδραστήρας ανοδικής ροής αναερόβιου στρώματος ιλύος (upflow anaerobic sludge blanket – UASB) είναι εμφανώς ο πιο πετυχημένος με ποσοστό χρήσης 75% (Σχήμα 5.27).

Σχήμα 5.27. Ποσοστά χρήσης διάφορων αναερόβιων αντιδραστήρων στη βιομηχανία πολτού και χάρτου.



Πηγή: European Commission, Μάιος 1992

6.5.2.2.3 1^η μέθοδος αναερόβιας αποσύνθεσης (διαδοχικός αντιδραστήρας)

Χρησιμοποιείται ένας αναερόβιος αντιδραστήρας που έχει τέσσερα πανομοιότυπα συστήματα, το κάθε ένα αποτελούμενο από τέσσερα στάδια. Κάθε στάδιο του αντιδραστήρα έχει ένα τριφασικό

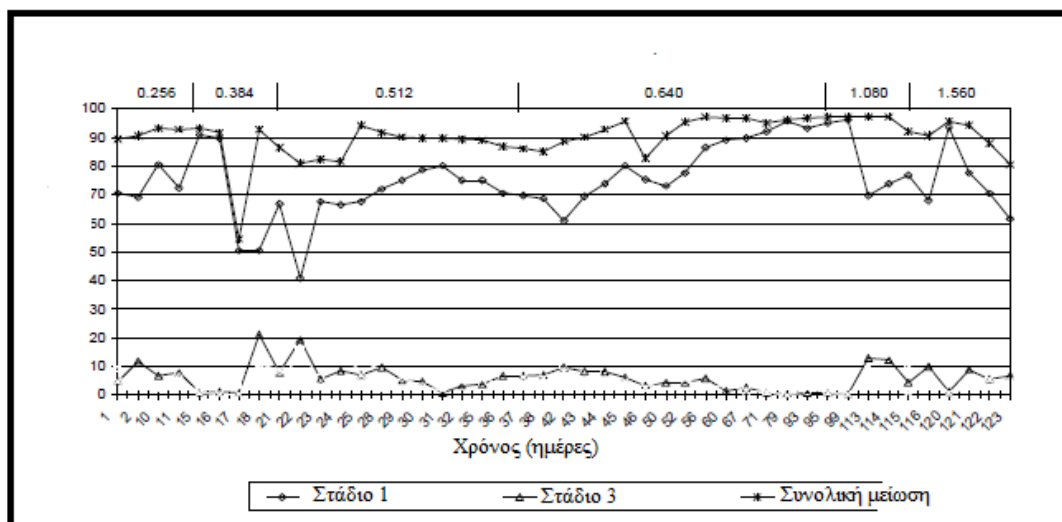
διαχωριστή – εκτροπέα, που τοποθετείται κάτω από τις εισόδους του απόβλητου, εμποδίζοντας τους επιπλέοντες κόκκους να εκπλυθούν με το απόβλητο. Κάθε στάδιο εξοπλίζεται με εισόδους δείγματος που επιτρέπουν βιολογικά στερεά και υγρά δείγματα να αφαιρούνται από το στρώμα ιλύος. Το λύμα εισέρχεται από σωλήνα και ρέει μέσα από το στρώμα ιλύος. Απόβλητα από κάθε στάδιο αντιδραστήρα ρέει λόγω βαρύτητας στο επόμενο, αφού κάθε στάδιο τοποθετείται σε βαθμωτή πλατφόρμα.

Ο αναερόβιος αντιδραστήρας τροφοδοτείται με ιλύ λυμάτων καθαρισμού. Αυτή φιλτράρεται σε κόσκινο οπών 2 mm και σε κάθε στάδιο του αντιδραστήρα, προστίθενται 7,5 L από αυτήν. Ο υπόλοιπος όγκος του αντιδραστήρα γεμίζει με νερό. Έπειτα, οι πλάκες κεφαλής προσδένονται και ο χώρος κεφαλής σε κάθε αντιδραστήρα γεμίζει με άζωτο για να απομακρύνει τον αέρα στο σύστημα, πριν την τροφοδοσία. Ο αντιδραστήρας σταθεροποιείται στους 37 °C για 24 ώρες σε 7 ημέρες.

Κατά την εκκίνηση, ένα συνθετικό (γλυκόζη) λύμα παρέχεται, λόγω της ικανότητας βιοδιάσπασης του, αφού είναι διαλυτός υδατάνθρακας και δεν περιορίζει το ρυθμό της αναερόβιας βιοδιάσπασης. Όταν ο αντιδραστήρας φτάνει στη σταθερή του κατάσταση (αφαίρεση COD κατά 90%), η τροφοδοσία συμπληρώνεται αυξητικά με λύμα από τους σταθμούς χάρτου για να επιτραπεί στα μεθανογενή βακτήρια να εγκλιματιστούν σε πιθανά ανασταλτικά αποτελέσματα από την περιεκτικότητα σε ανθεκτικές ουσίες.

Από την 42^η ημέρα, ο αντιδραστήρας τροφοδοτείται με 100% λύματα σταθμού χάρτου. Κατά την περίοδο εγκλιματισμού, η αφαίρεση COD ήταν 88%. Αυτό υποδεικνύει ότι δεν υπάρχουν σημαντικές μειώσεις στην αποτελεσματικότητα αφαίρεσης του COD όταν τα λύματα είναι πάνω από 90% στην τροφοδοσία. Είναι φανερό ότι τα στάδια 2,3 και 4 συνεισφέρουν ελάχιστα στη μείωση COD (λιγότερο από 10%), ενώ στο στάδιο 1 σημειώνεται μείωση 60 – 90% (Σχήμα 5.28). Αυτά τα αποτελέσματα συγκρίνονται με άλλες τεχνικές : οι αντιδραστήρες μονού σταδίου παρουσιάζουν 45 – 65% μείωση COD, ενώ αυτοί των πολλαπλών σταδίων 65 – 75%. (Chelliapan Shreeshivadasan,2012)

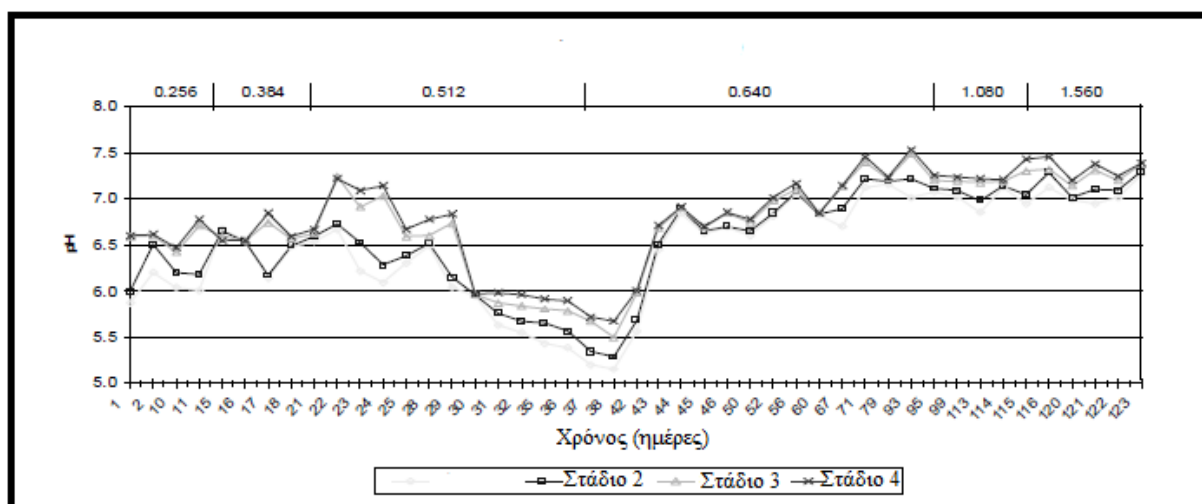
Σχήμα 5.28. Μείωση COD (%)



Πηγή: Chelliapan Shreeshivadasan,2012

Το pH παίρνει την τιμή 7 όταν ο αντιδραστήρας λειτουργεί με 100% λύμα από τους σταθμούς χάρου, υποδεικνύοντας ότι η οξεογένεση και η μεθανογένεση έχουν ισορροπημένα επίπεδα. Η μείωση του pH ακολουθεί την σειρά στάδιο 1 > στάδιο 2 > στάδιο 3 > στάδιο 4 (Σχήμα 5.29).

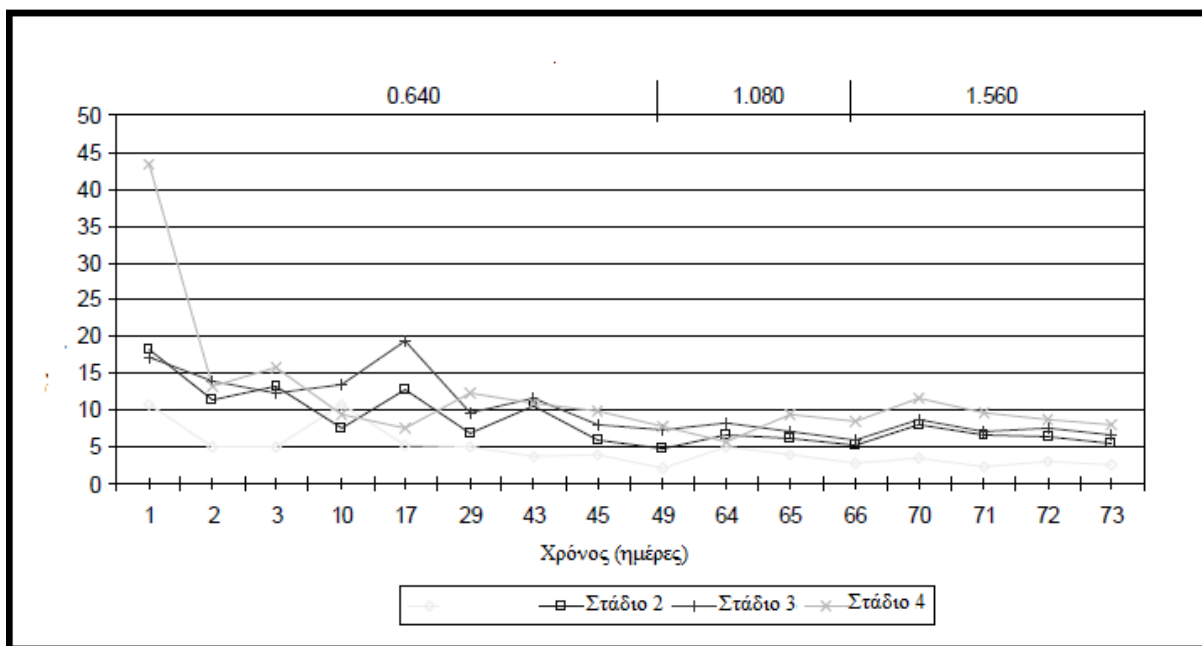
Σχήμα 5.29. Το pH σε σχέση με τον χρόνο



Πηγή: Chelliapan Shreeshivadasan,2012

Η απόπλυση ιλύος μετριέται συχνά (Σχήμα 5.30) και έτσι, η περιεκτικότητα σε πτητικά αιωρούμενα στερεά ποικίλλει από 50 mg / L σε 100 mg / L.

Σχήμα 5.30. Απόπλυση ιλύος (περιεκτικότητα σε CO₂) από τον αντιδραστήρα

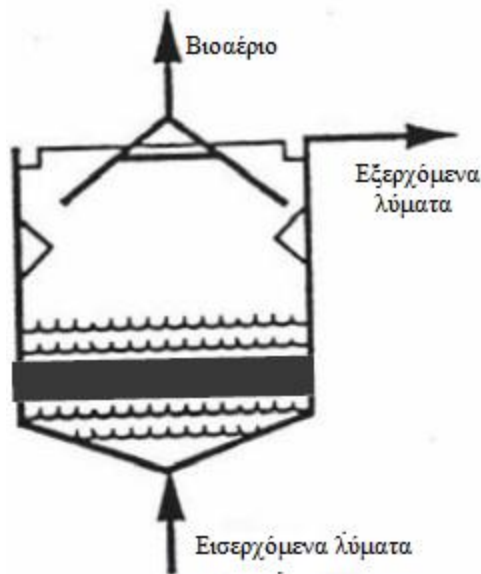


Πηγή: Chelliapan Shreeshivadasan,2012

6.5.2.2.4 2^η μέθοδος αναερόβιας αποσύνθεσης (UASB αντιδραστήρας)

Τα λύματα εισάγονται από το κάτω μέρος του αντιδραστήρα και περνούν μέσα από ένα στρώμα ενεργούς, συχνά κοκκώδους, ιλύος (αντιδραστήρας ανοδικής ροής αναερόβιου στρώματος ιλύος, upflow anaerobic sludge blanket - UASB) (Σχήμα 5.31).

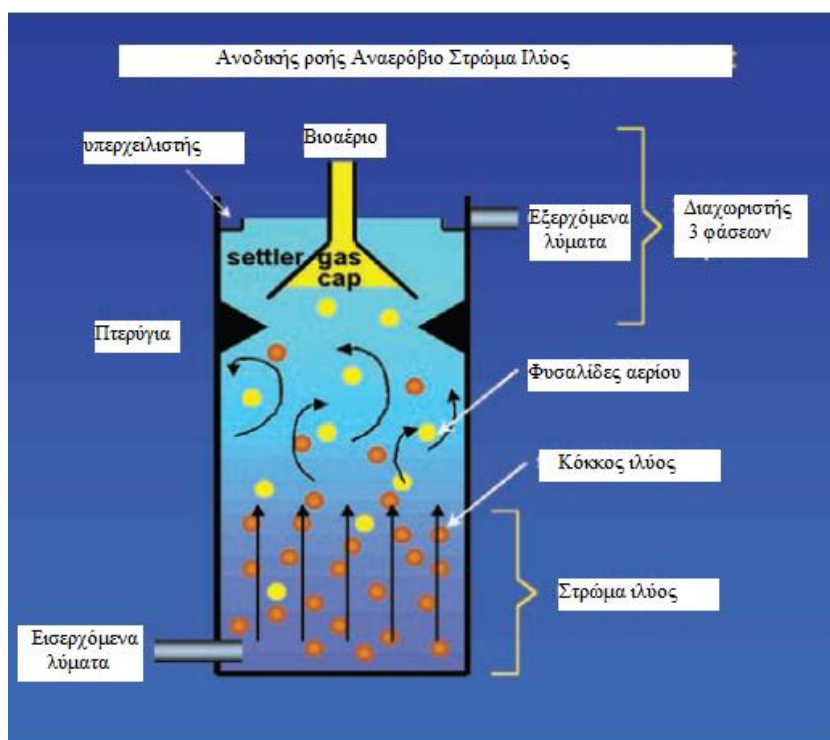
Σχήμα 5.31. Γενική διάταξη αντιδραστήρα



Πηγή: Chelliapan Shreeshivadasan, 2012

Ένας διαχωριστής αερίων – στερεών (gas solids separator - GSS) κοντά στην επιφάνεια της δεξαμενής ξεχωρίζει φυσαλίδες αερίου από τα στερεά και επιτρέπει στα τελευταία να καθιζάνουν. Το φιλτραρισμένο απόβλητο αποσύρεται στην κορυφή του αντιδραστήρα. Παρέχεται ανάμειξη από τις ανερχόμενες φυσαλίδες αερίου και την ανοδική τροφοδοσία. Η συγκεκριμένη σχεδίαση έχει κερδίσει γρήγορα την αποδοχή εξαιτίας της ικανότητας του αντιδραστήρα να λειτουργεί αποτελεσματικά σε ρυθμό υψηλού φορτίου με λίγα αιωρούμενα στερεά με χαμηλό κόστος κατασκευής. Επίσης, ο αντιδραστήρας αυτός βασίζεται στην τάση των αναερόβιων βακτηρίων να σχηματίζουν θρόμβους ή κόκκους που καθιζάνουν αποτελεσματικά (Σχήμα 5.32).

Σχήμα 5.32. Αναλυτική διάταξη αντιδραστήρα



Πηγή: Chelliapan Shreeshivadasan, 2012

Τα λύματα σταθμού χάρτου επεξεργάστηκαν επιτυχώς χρησιμοποιώντας έναν αναερόβιο αντιδραστήρα σταδίων. Μία μέση μείωση του COD κατά 95% παρατηρήθηκε στο σύστημα αντιδραστήρα, επιβεβαιώνοντας αντοχή των μεθανογενών μικροοργανισμών στα ανθεκτικά λύματα. Οι αντιδραστήρες σταδίων μπορούν να παρέχουν υψηλή αποτελεσματικότητα επεξεργασίας για ανθεκτικές ουσίες εξαιτίας του διαχωρισμού φάσεων, που παράγει διαφορετικά περιβάλλοντα για την οξεογένεση και τη μεθανογένεση, και επίσης, προωθεί ευνοϊκές συνθήκες για μικροβιακούς πληθυσμούς που συμπεριλαμβάνονται στην αποσύνθεση ανθεκτικών ενώσεων.

6.5.2.3 Αερόβια αποσύνθεση υγρών αποβλήτων

Η ενεργός ιλύς και οι αεριζόμενες δεξαμενές ή αεριζόμενες λεκάνες σταθεροποίησης είναι οι αερόβιες διεργασίες που συνήθως χρησιμοποιούνται. Αρκετές έρευνες έδειξαν ότι η διεργασία ενεργού ιλύος μπορεί αποτελεσματικά να μειώσει τους ρύπους, όπως BOD, COD και AOX. Εξαιτίας της υψηλής αποτελεσματικότητας απομάκρυνσης των COD, BOD κτλ που είναι 70% και 90% αντίστοιχα, στη διεργασία ενεργούς ιλύος, συμπεραίνεται ότι είναι κατάλληλη για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων πολτού και χάρου παρά την παραγωγή υψηλής ποσότητας ιλύος. Οι Bryant (1997), Achoha (2002), Mahmood και Pace (2006) και Ghoreiski και Haghighi (2007) ερεύντησαν την εφαρμογή των αεριζόμενων λεκανών σταθεροποίησης και έδειξαν ότι μπορεί να αφαιρέσει 50 – 70% BOD, 30 – 40% COD, όπως και AOX, ενώ το ποσό επιπρόσθετων θρεπτικών ουσιών είναι μικρότερο από αυτό που απαιτείται στην ενεργό ιλύ.

6.5.2.3.1 Αεριζόμενες δεξαμενές (Λεκάνες σταθεροποίησης)

Ένας τύπος βιολογικής επεξεργασίας συχνά χρησιμοποιείται για υγρά απόβλητα πολτού και χάρτου είναι η αεριζόμενη δεξαμενή, που είναι μία μεγάλη, ρηχή (~4m) τεχνητή λίμνη όπου τα λύματα επεξεργάζονται βιολογικά με ενεργούς μικροοργανισμούς και μηχανικό αερισμό. Η αεριζόμενη δεξαμενή καταναλώνει αρκετό χώρο αφού διαστασιοποιείται για χρόνο παραμονής 5 – 7 ημερών και καταναλώνει αρκετή ενέργεια για αερισμό. Όμως, είναι εύκολη στο χειρισμό και τη διατήρηση.

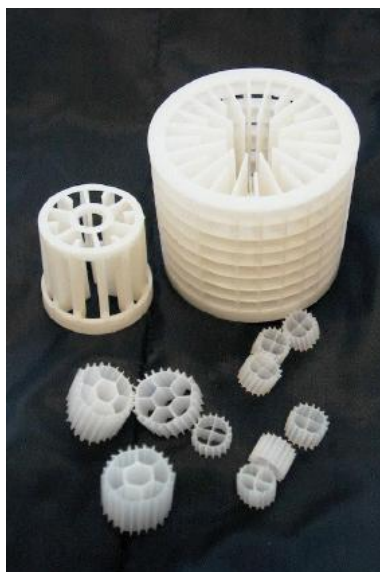
Οι αεριζόμενες δεξαμενές είναι απλά και βιολογικά συστήματα και χρησιμοποιούνται για την αφαίρεση COD, AOX χαμηλού μοριακού βάρους και λαπαρών οξέων. Οι Stuthridge και Macfarlane (1994) έδειξαν ότι 70% των AOX μπορούν να αφαιρεθούν αποτελεσματικά. Η αποτελεσματικότητα αφαίρεσης εξαρτάται από το χρόνο παραμονής, το pH, τη θερμοκρασία, την ποσότητα ιλύος και το βαθμό αερισμού.

6.5.2.3.2 Αερόβιο βιολογικό φίλτρο

Τα τελευταία, 20 χρόνια, η αερόβια επεξεργασία όπως συστήματα ενεργούς ιλύος, βιολογικά φίλτρα κτλ χρησιμοποιούνται ευρέως και παρέχουν καλή μείωση COD.

Το αερόβιο βιολογικό φίλτρο είναι ένας νέος τύπος σταθερού αντιδραστήρα βιομεμβρανών. Το φίλτρο περιέχει ένα σταθερό μέσο που έχει μεγάλη επιφάνεια, στην οποία συγκολλούνται οι μικροοργανισμοί και έτσι, αναπτύσσονται σε βιομεμβράνες για την αποτελεσματική αφαίρεση ρύπων. Τα μέσα αυτά αποτελούνται από πέτρες, άμμο ή κάποιο είδος πλαστικού υλικού. Ένα παράδειγμα κάποιων πλαστικών φορέων φαίνεται στο Σχήμα 5.33.

Σχήμα 5.33. Διάφοροι φορείς που χρησιμοποιούνται στη διεργασία βιοφίλτρου

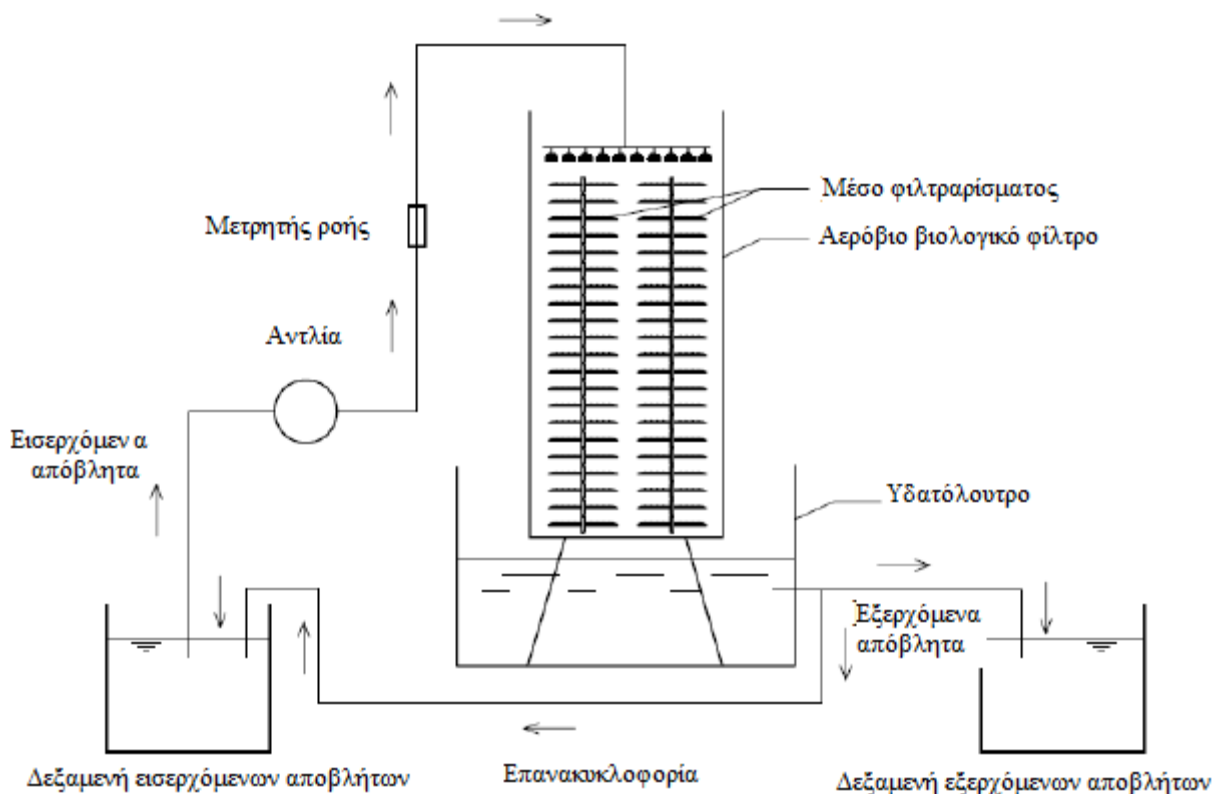


Πηγή: Chelliapan Shreeshivadasan,2012

Το αερόβιο βιολογικό φίλτρο κατασκευάζεται ως δεξαμενή χρησιμοποιώντας πλαστικές σανίδες PVC ως υλικό (Σχήμα 5.34). Το μέσο του φίλτρου είναι ημι - μαλακό πλαστικό υιοθετείται σύστημα ομοιόμορφης διανομής νερού μέσω μίας μικρής αντλίας. Ο εξοπλισμός ανατροφοδότησης βρίσκεται ανάμεσα στη δεξαμενή και το φίλτρο. Η θερμοκρασία του νερού ελέγχεται από σταθερής θερμοκρασίας υδατόλουτρο.

Στην αρχική περίοδο λειτουργίας του φίλτρου, μέρος των αποβλήτων, ρύπων και βακτηρίων προσαρτείται στην επιφάνεια του μέσου, με τα απόβλητα να ρέουν προς αυτό. Μικροοργανισμοί αναπτύσσονται ραγδαία στην επιφάνεια του και μία μεμβράνη γεμάτη από αυτούς σχηματίζεται, που ονομάζεται βιομεμβράνη. Η αρχική φάση συνήθως ονομάζεται εκκίνηση που είναι η ώριμη περίοδος των βιομεμβρανών και μόνο μετά τη λήξη της, το φίλτρο χρησιμοποιείται σε κανονική λειτουργία. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τις βιομεμβράνες είναι πολλοί, όπως το είδος επιφάνειας του μέσου, η θερμοκρασία, το pH κτλ. Η εκκίνηση θεωρείται επιτυχής όταν ο ρυθμός αφαίρεσης του COD είναι σταθερά μεγαλύτερος από 60%. (Wei X.M., 2010)

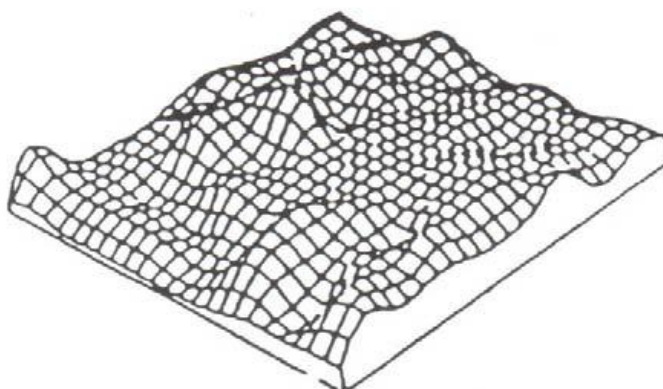
Σχήμα 5.34. Σχηματικό διάγραμμα εγκατάστασης βιολογικού φίλτρου



Πηγή: Wei X.M., 2010

Η δομή των βιομεμβρανών (βιοφίλμ) επηρεάζεται από εξωτερικές διατμητικές δυνάμεις, εσωτερική κατανομή φαινομένων διάχυσης, και μικροβιακό ανταγωνισμό. Οι διατμητικές δυνάμεις καθορίζουν το πάχος του υμενίου, αλλά επίσης και τη δομή της επιφάνειας του υμενίου. Στα περισσότερα συστήματα αντιδραστήρων με αντιδραστήρες βιοφίλμ οι διατμητικές τάσεις δεν είναι ομοιόμορφες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα ένα ανομοιόμορφο σχηματισμό δομών βιοφίλμ όπως αυτό του Σχήματος 5.35, όπου απεικονίζεται η δομή της επιφάνειας βιοφίλμ μετά από ανάπτυξη 48 h.

Σχήμα 5.35. Διαμόρφωση επιφάνειας βιοφίλμ μετά από ανάπτυξη 48 h

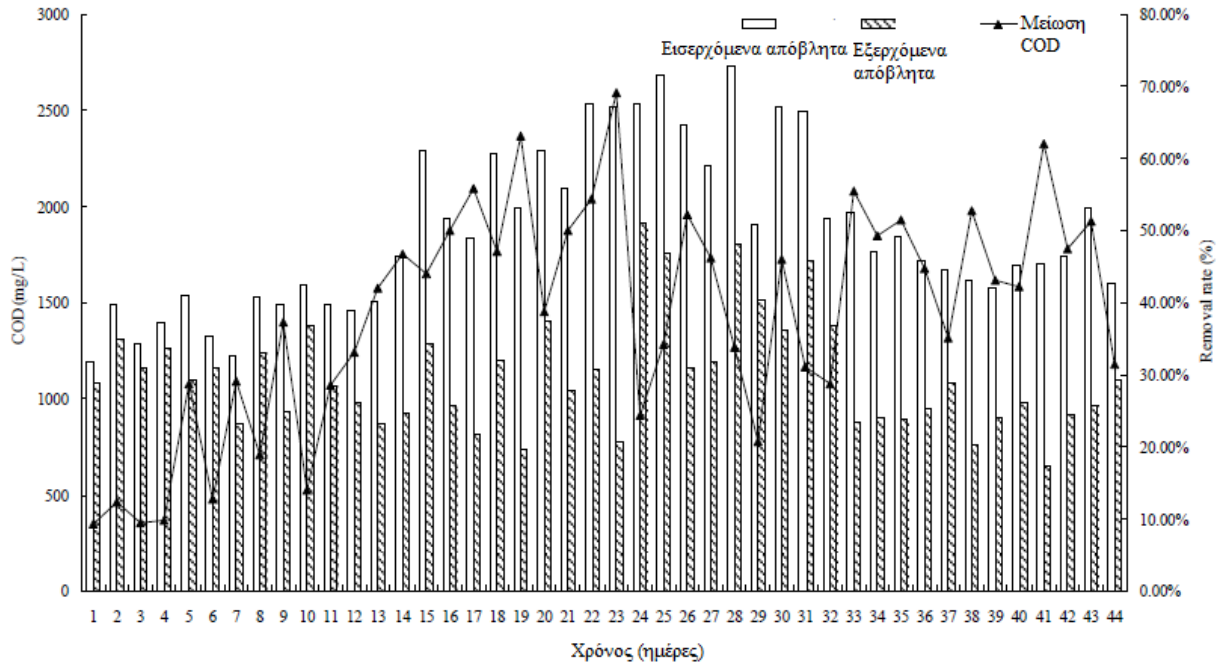


Πηγή: Wei X.M., 2010

Στα Σχήματα 5.36, 5.37 και 5.38 παρουσιάζεται η συγκέντρωση COD στα εισερχόμενα και εξερχόμενα απόβλητα για θερμοκρασίες 17 – 19.5 °C, 25.2 – 27 °C και 31 – 33 °C αντίστοιχα. Όπως

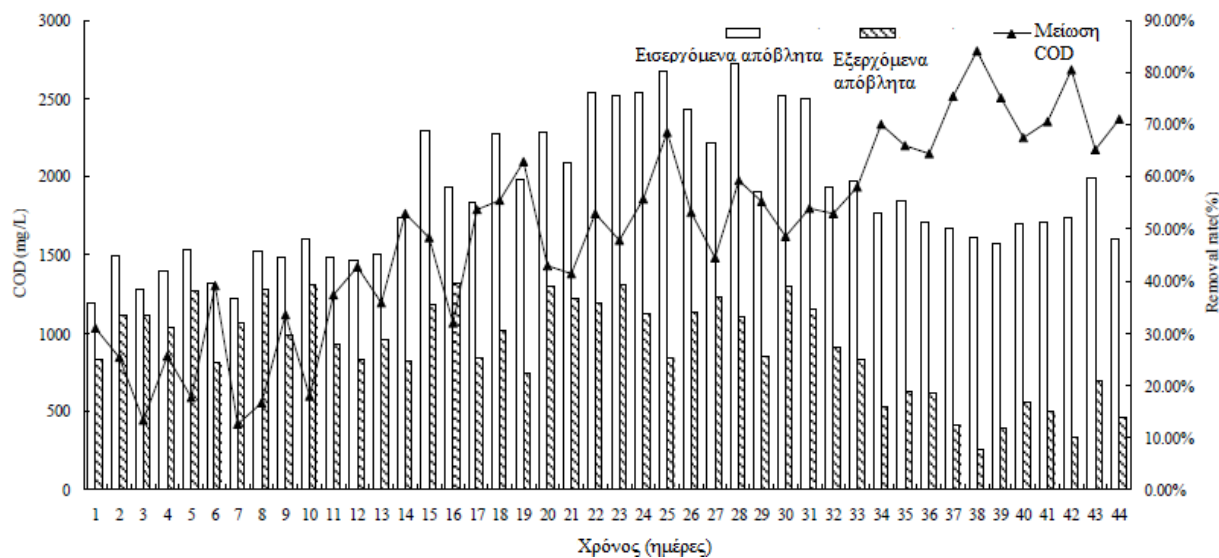
φαίνεται στο Σχήμα 5.40, η μείωση του COD είναι αρκετά χαμηλή (τον περισσότερο χρόνο κάτω από 60%) και γενικά δεν είναι σταθερή. Το ίδιο συμβαίνει και για τις θερμοκρασίες 25.2 – 27 °C και 31 – 33 °C, όπου η μείωση είναι πολύ μικρή τις πρώτες μέρες, αλλά κυρίως η δεύτερη επιτυγχάνει συνεχώς πάνω από 60% και η υψηλότερη μείωση είναι 89.9%. Έτσι, για θερμοκρασίες 17 – 19.5 °C η εκκίνηση δεν επιτυγχάνεται σε 44 ημέρες. Για θερμοκρασίες 25.2 – 27 °C, η εκκίνηση αρχίζει μετά τις 33 ημέρες, ενώ για 31 – 33 °C, μόνο 28 ημέρες χρειάζονται. Αυτό υποδηλώνει ότι η αύξηση θερμοκρασίας επηρεάζει την εκκίνηση. Σε συγκεκριμένο εύρος, η υψηλή θερμοκρασία προκαλεί μικρότερο χρόνο εκκίνησης της διεργασίας.

Σχήμα 5.36. Συγκέντρωση COD σε εισερχόμενα και εξερχόμενα απόβλητα για θερμοκρασίες 17 – 19.5 °C



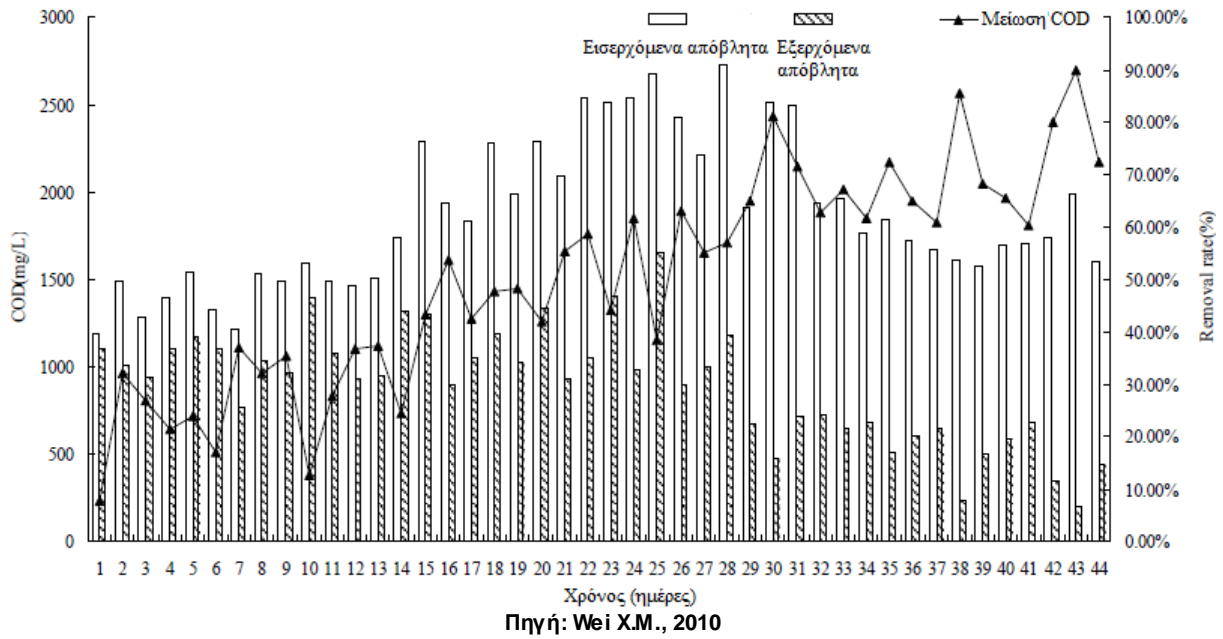
Πηγή: Wei X.M., 2010

Σχήμα 5.37. Συγκέντρωση COD σε εισερχόμενα και εξερχόμενα απόβλητα για θερμοκρασίες 25.2 – 27 °C



Πηγή: Wei X.M., 2010

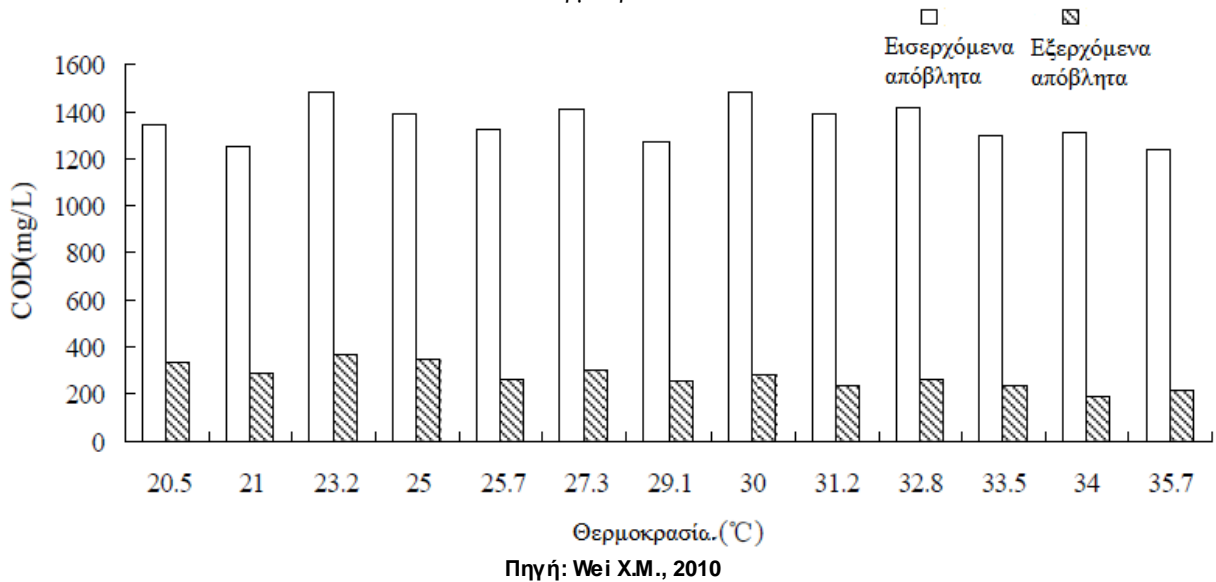
Σχήμα 5.38. Συγκέντρωση COD σε εισερχόμενα και εξερχόμενα απόβλητα για θερμοκρασίες 31 - 33 °C



Η θερμοκρασία είναι ένας από τους σημαντικούς παράγοντες για το μεταβολισμό μικροοργανισμών. Σε κάποιο εύρος θερμοκρασίας, οι δραστηριότητες μεταβολισμού των περισσότερων μικροοργανισμών ενισχύονται με αύξηση θερμοκρασίας ή εξασθενούν με τη μείωσή της. Η κατάλληλη θερμοκρασία αερόβιων θερμοκρασιών είναι 10 – 35 °C. Συνήθως, θερμοκρασία κάτω από 10 °C προκαλεί αρνητικό αποτέλεσμα στη βιολογική επεξεργασία.

Η επιρροή της θερμοκρασίας στο COD των εισερχόμενων και εξερχόμενων αποβλήτων φαίνεται στο Σχήμα 5.39, όπου επιτυγχάνεται μείωση του με αύξηση της θερμοκρασίας (Πίνακας 5.5).

Σχήμα 5.39. Συγκέντρωση COD σε εισερχόμενα και εξερχόμενα απόβλητα στο βιοφίλτρο για διαφορετική θερμοκρασία



Πίνακας 5.5. Μείωση COD στο βιοφίλτρο για διαφορετική θερμοκρασία

Θερμοκρασία:(°C)	COD μείωση (%)
20.5	75.1
21.0	76.8
23.2	74.6
25.0	75.4
25.7	80.3
27.3	78.6
29.1	80.1
30.0	81.2
31.2	83.3
32.8	81.5
33.5	81.8
34.0	85.6
35.7	82.0

Πηγή: Wei X.M., 2010

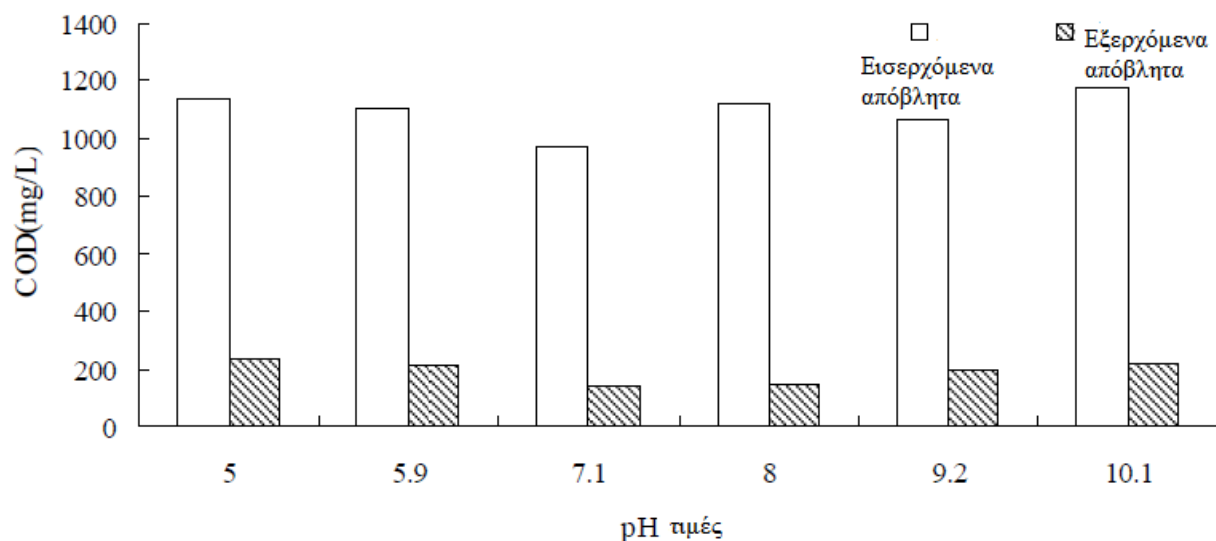
Συνήθως, το βέλτιστο pH είναι 6 – 8 για την ανάπτυξη μικροοργανισμών. Αν η τιμή του pH ξεπερνά αυτά τα όρια, παρουσιάζεται αρνητικό αποτέλεσμα στη δραστηριότητα μικροοργανισμών. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.6, όταν το pH αλλάζει με εύρος 5 – 8, η μείωση COD σταδιακά αυξάνει με την αύξηση του pH. Η βέλτιστη μείωση COD (86.9%) παρατηρείται για pH 8, αλλά πάνω από αυτήν την τιμή η αφαίρεση COD μειώνεται σημαντικά. Έτσι, το βέλτιστο εύρος pH για τη μείωση COD είναι 7.1 – 8, και όταν το pH είναι εκτός αυτών των ορίων, η αφαίρεση COD μειώνεται. Σε αυτήν την περίοδο, ο ρυθμός μείωσης είναι μεγαλύτερος από 85% (Σχήμα 5.40).

Πίνακας 5.6. Μείωση COD στο βιοφίλτρο για διαφορετικό pH

pH τιμές	COD μείωση (%)
5.0	79.2
5.9	80.4
7.1	85.7
8.0	86.9
9.2	81.7
10.1	81.4

Πηγή: Wei X.M., 2010

Σχήμα 5.40. Συγκέντρωση COD σε εισερχόμενα και εξερχόμενα απόβλητα στο βιοφίλτρο για διαφορετικό pH



Πηγή: Wei X.M., 2010

Η μέθοδος επανακυκλοφορίας συνήθως υιοθετείται για επεξεργασία υγρών απόβλητων σε αερόβιο βιολογικό φίλτρο. Υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα για τη χρήση επανακυκλοφορίας, όπως η βελτίωση της αποτελεσματικότητας της επεξεργασίας και η μείωση οσμών.

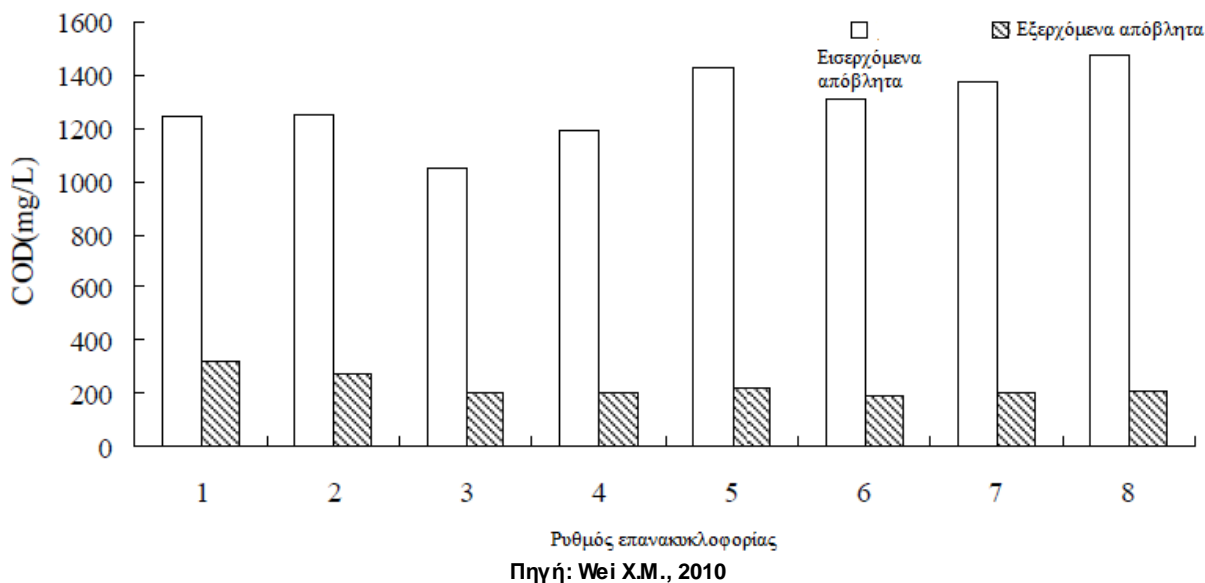
Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.7, η αφαίρεση COD βελτιώνεται σημαντικά καθώς ο ρυθμός επανακυκλοφορίας αυξάνει. Όταν αυτός ξεπεράσει το 4, η μείωση COD ελάχιστα βελτιώνεται με την αύξηση του συγκεκριμένου ρυθμού, που υποδεικνύει ότι η εναπομείνουσα οργανική ύλη στα απόβλητα επανακυκλοφορίας είναι δύσκολο να αποσυντεθεί (Σχήμα 5.41). Έτσι, χρειάζεται κατάλληλος ρυθμός επανακυκλοφορίας για τη βελτίωση αφαίρεσης ρύπων από το φίλτρο.

Πίνακας 5.7. Μείωση COD στο βιοφίλτρο για διαφορετικό ρυθμό επανακυκλοφορίας

Ρυθμός επανακυκλοφορίας	COD μείωση (%)
1	74.1
2	78.6
3	80.5
4	83.3
5	84.8
6	85.1
7	85.3
8	85.8

Πηγή: Wei X.M., 2010

Σχήμα 5.41. Συγκέντρωση COD σε εισερχόμενα και εξερχόμενα απόβλητα στο βιοφίλτρο για διαφορετικό ρυθμό επανακυκλοφορίας



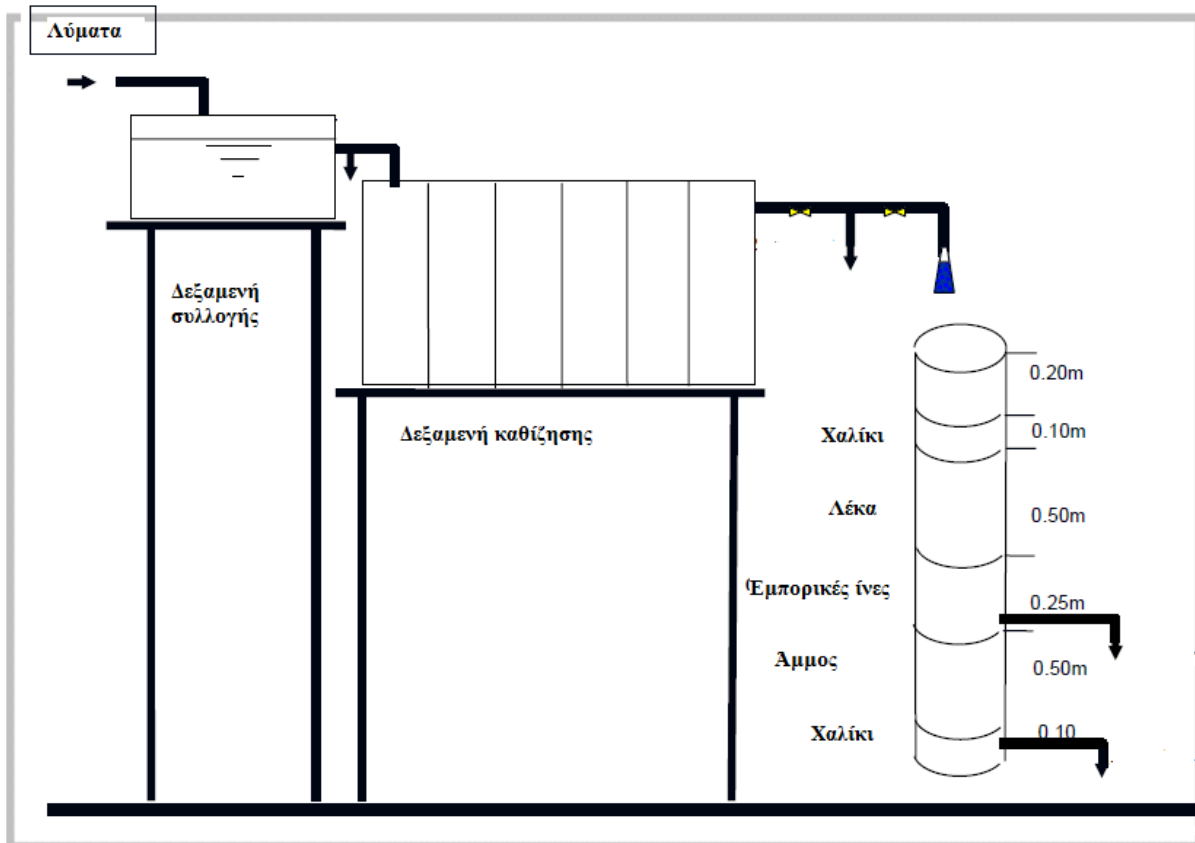
6.5.2.3.3 Διασταλλαγματικό φίλτρο

Η επεξεργασία αποβλήτων χρησιμοποιώντας βιομεμβράνες είναι ο πρώτος βιοαντιδραστήρας συνεχούς ροής που εφαρμόστηκε έναν αιώνα πριν. Έγινε γνωστός διασταλλαγματικό φίλτρο (trickling filter - TF) επειδή τα απόβλητα τροφοδοτούνται σταδιακά διαμέσου μέσων στήριξης και διεισδύουν μέσω αυτών όπου οι οργανικές ουσίες αφαιρούνται ή φιλτράρονται από μικροοργανισμούς που συνθέτουν τη βιομεμβράνη.

Αποτελείται από μια κλίνη με ένα υλικό υποστήριξης πάνω από το οποίο διανέμονται τα υγρά απόβλητα, τα οποία διεισδύουν πάνω από τα αναπτυσσόμενα βιοφίλμ που προσκολλώνται στο υλικό του φορέα υποστήριξης της κλίνης. Στο παρελθόν τα περισσότερα τέτοια βιολογικά φίλτρα χρησιμοποιούσαν χαλίκι ή πέτρες διαμέτρου 25 – 100 mm. Περισσότερο από μια δεκαετία όμως πλέον χρησιμοποιούνται χαμηλής πυκνότητας πλαστικά μέσα υποστήριξης / προσάρτησης των μικροοργανισμών όπως το πολυστυρένιο και το πολυβινυλωρίδιο.

Στο Σχήμα 5.42, παρουσιάζεται η γενική εικόνα του φίλτρου, όπου το πρώτο στάδιο είναι η καθίζηση (προεπεξεργασία) και το δεύτερο είναι το φιλτράρισμα. (Hegazy Badr El-Din E., 2013)

Σχήμα 5.42. Βιολογικό διασταλλαγματικό φίλτρο



Πηγή: Hegazy Badr El-Din E., 2013

Η δεξαμενή συλλογής φτιάχτηκε από γαλβανισμένο χάλυβα όπως και η δεξαμενή καθίζησης. Επίσης, στη τελευταία τοποθετούνται φύλλα πλαστικού διχτυού (μεμβράνες) κάθετα στην κατεύθυνση ροής των λυμάτων για να επιτευχθεί η αφαίρεση κάποιων ακαθαρσιών και λειτουργούν και ως μέσα βακτηριακής ανάπτυξης.

Ως κάθετο φίλτρο χρησιμοποιείται αγωγός UPVC. Στο εσωτερικό του, τοποθετείται στρώμα από υλικά όπως χαλίκι, λέκα, εμπορικές ίνες, χονδρόκοκκη άμμος και ξανά χαλίκι στον πυθμένα του. Το μέσο φιλτραρίσματος πρέπει να επιτρέπει στα απόβλητα να περνούν προς τα κάτω και στον αέρα να περνά προς τα πάνω.

Στον Πίνακα 5.8, παρουσιάζονται τα μέσα χημικά χαρακτηριστικά των λυμάτων που εισέρχονται στο φίλτρο με 7.2 pH, 743,3 mg / l COD, 361.3 mg / l BOD και 332.5 mg / l αιωρούμενα στερεά.

Πίνακας 5.8. Μέσα χημικά χαρακτηριστικά των λυμάτων πριν την επεξεργασία

Χημικές παράμετροι	1η βδομάδα	2η βδομάδα	3η βδομάδα	4η βδομάδα	Μέσος όρος
PH	7.2	7.11	7.13	7.2	7.2
COD mg/l	795	700	665	813	743.3
BOD mg/l	396	321	313	415	361.3
TSS mg/l	340	330	310	350	332.5

Πηγή: Hegazy Badr El-Din E., 2013

Μετά την πρωτοβάθμια επεξεργασία, που χρησιμοποιεί φίλτρα ή δεξαμενές καθίζησης που αφαιρούν τις καθιζόμενες οργανικές και ανόργανες στερεές ουσίες, τα COD, BOD και τα αιωρούμενα στερεά παρουσιάζουν μείωση κατά 18.7%, 16.8% και 14.1% αντιστοίχως (Πίνακας 5.9).

Πίνακας 5.9. Μέσα χημικά χαρακτηριστικά των λυμάτων μετά την πρωτοβάθμια επεξεργασία

Χημικοί παράμετροι	1η βδομάδα	2η βδομάδα	3η βδομάδα	4η βδομάδα	Μέσος όρος
PH	7.2	7.1	7.1	7.1	7.1
COD mg/l	621	620	611	566	604.5
BOD mgo2/l	291	268	321	322	300.5
TSS mg/l	288	254	289	311	285.5

Πηγή: Hegazy Badr El-Din E, 2013

Πρόσθετη αφαίρεση οργανικών ουσιών γίνεται με τη δευτεροβάθμια επεξεργασία που αποτελείται από βιολογική επεξεργασία των λυμάτων χρησιμοποιώντας το διασταλλαγματικό φίλτρο, που είναι ικανό να απομακρύνει αιωρούμενα στερεά και οργανικούς, ανόργανους και παθογόνους μικροοργανισμούς. Το διασταλλαγματικό φίλτρο αποτελείται από δύο στάδια. Με το πρώτο στάδιο, οι μειώσεις των COD, BOD και αιωρούμενων στερεών είναι 62.1%, 57.5% και 59.8% αντίστοιχα, ενώ στο δεύτερο στάδιο η μείωση γίνεται ακόμα μεγαλύτερη (Πίνακας 5.10).

Πίνακας 5.10. Μέσα χημικά χαρακτηριστικά των λυμάτων κατά την πρωτοβάθμια επεξεργασία, τα δύο στάδια του φίλτρου και η συνολική τους μείωση

Χημικές παράμετροι	Πρωτοβάθμια επεξεργασία	1ο στάδιο φίλτρου	2ο στάδιο φίλτρου	Συνολική αφαίρεση (%)
COD mg/l	138.8 (18.7%)	375.2(62.1%)	182.3(79.5%)	669.3(90%)
BOD mgo2/l	60.8 (16.8%)	172.7(57.5%)	101.3(79.3%)	334.8(92.7%)
TSS mg/l	47(14.1%)	170.7(59.8%)	79.8(69.5%)	297.5(89.5%)

Πηγή: Hegazy Badr El-Din E, 2013

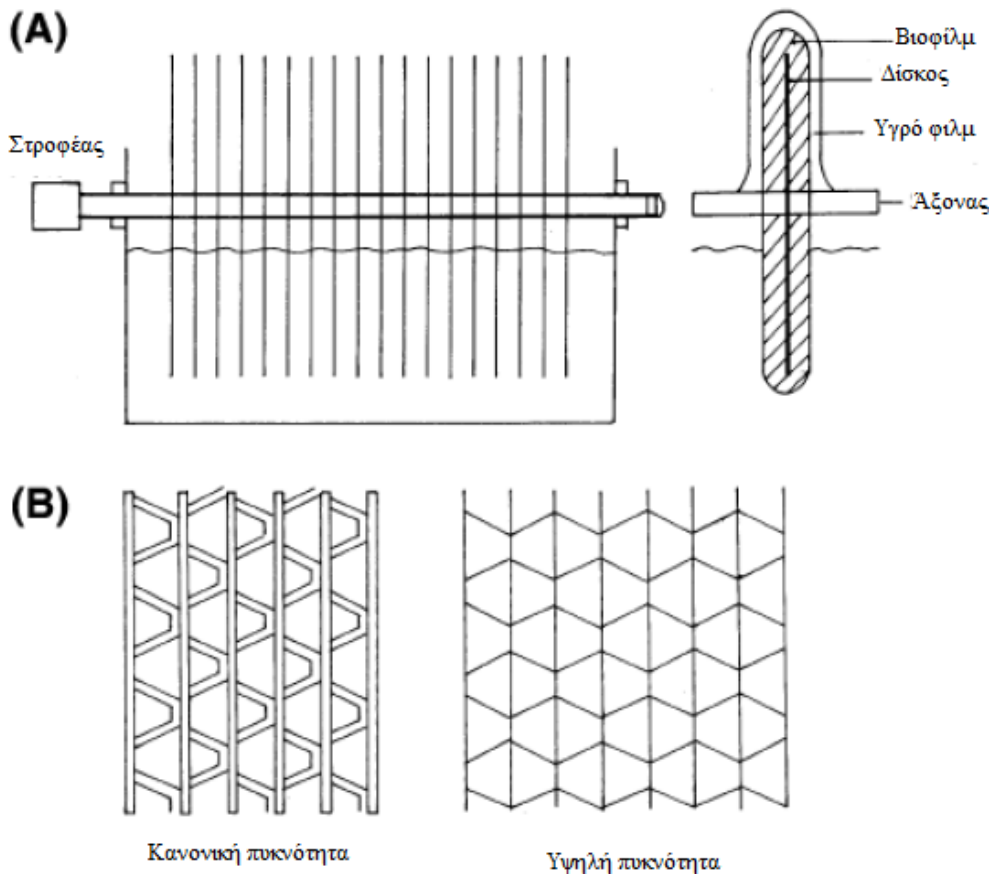
Επομένως, το διασταλλαγματικό φίλτρο αποδεικνύεται ένα πολύ αξιόπιστο εργαλείο για τον έλεγχο και την επαναχρησιμοποίηση λυμάτων.

6.5.2.3.4 Περιστρεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι (Rotating Biological Contactors - RBCs)

Οι περιστρεφόμενοι βιολογικοί δίσκοι έχουν χρησιμοποιηθεί εκτεταμένα στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Οι RBCs αποτελούνται ουσιαστικά από ένα σύνολο δίσκων που τοποθετούνται σε έναν οριζόντιο άξονα. Οι δίσκοι εμβαπτίζονται εν μέρει (40 – 45%) στα υγρά απόβλητα ενώ ταυτόχρονα εκτίθενται εν μέρει στον αέρα. Το σύνολο του στροφέα αποτελείται από ένα άξονα με τους συνημμένους δίσκους που περιστρέφονται με ταχύτητα 1 – 10 περιστροφές / λεπτό με τη βοήθεια μιας μηχανής ή συμπιεσμένου αέρα. Η περιστροφή των δίσκων παράγει ένα στρώμα υγρού στην επιφάνεια κάθε δίσκου. Δεδομένου ότι ο δίσκος περιστρέφεται, το στρώμα αυτό εκτίθεται στον αέρα, κάτι που επιτρέπει τον αερισμό των υγρών αποβλήτων και επιτρέπει στους αερόβιους οργανισμούς που προσκολλώνται στην επιφάνεια του δίσκου να αποδομούν τις οργανικές ενώσεις των αποβλήτων. Το σύνολο δίσκων στο οποίο η βιομάζα αναπτύσσεται αποτελεί το μέσο του συστήματος. Κατά συνέπεια, σε γενικές γραμμές, αυτοί οι βιολογικοί επαφείς (contactors) επιτρέπουν την επαφή μεταξύ της αέριας και της υγρής φάσης. Οι διατμητικές δυνάμεις που ασκούνται στη βιομάζα κατά τη διάρκεια της κίνησης του δίσκου μέσα στα υγρά απόβλητα αναγκάζουν την περίσσεια της βιομάζας να αποκολληθεί από το μέσο και να αναμειγνύεται με το υπόλοιπο υγρό. Έτσι αποτρέπεται η απόφραξη των μέσων και διατηρείται ένας σταθερός πληθυσμός μικροοργανισμών. Τα προσκολλητικά μέσα εξυπηρετούν τις ακόλουθες λειτουργίες: (I) παρέχεται μια ικανή επιφάνεια για την ανάπτυξη μιας σταθερής βιολογικής καλλιέργειας, (II) επιτρέπουν την επαφή των υγρών αποβλήτων με τον αέρα, με αυτόν τον τρόπο

αεριζοντας τα υγρά απόβλητα. Ένα σύνολο δίσκων διατηρείται σε ταυτόχρονη λειτουργία σε μια μονάδα, και περισσότερες της μιας τέτοιες μονάδες μπορούν να συνδυαστούν σε σειρά ή παράλληλα. Η βιολογική μεμβράνη και το στρώμα της υγρής φάσης που παράγονται από την περιστροφή δίσκων παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.43.

Σχήμα 5.43. (Α) Διάταξη μιας μονάδας RBC. Παρουσιάζεται η δημιουργία του βιοφίλμ και του στρώματος του υγρού. (Β) Διαφορετικού τύπου προσκολλητικά μέσα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε RBCs



Πηγή: Hegazy Badr E-Din E., 2013

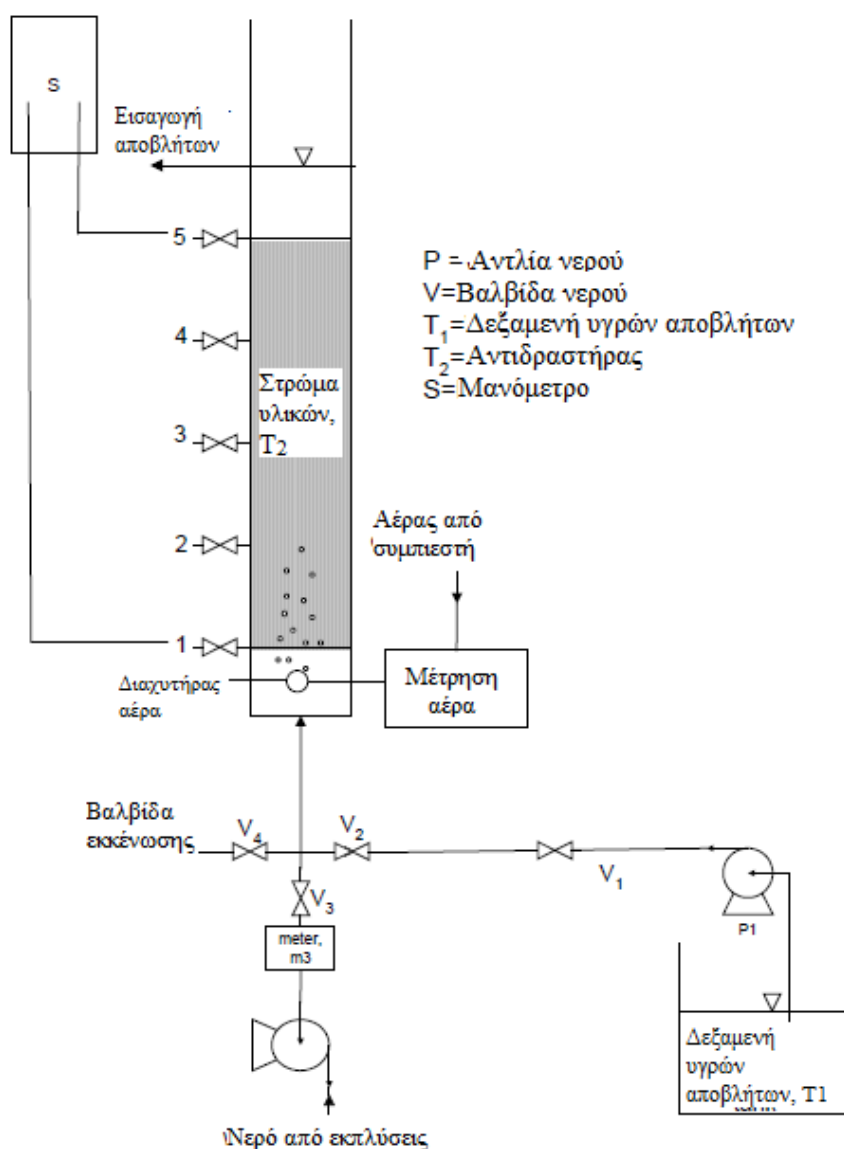
6.5.2.3.5 Βιοφίλτρο ανοδικού αέρα με μέσα άμμου

Η διεργασία αεριζόμενου βιοφίλτρου, όντας απλή, με χαμηλό κόστος κατασκευής, ευέλικτη, εύκολη στη λειτουργία και συντήρηση, εμφανίζεται κατάλληλη στις απαιτήσεις επεξεργασίας λυμάτων. Συνδυάζει αερισμό και διήθηση σε μία μονάδα χρησιμοποιώντας ένα αδρανές υλικό στήριξης για το φιλτράρισμα.

Το αεριζόμενο βιοφίλτρο λειτουργεί με ανοδικό ρεύμα αέρα (up-flow aerated biofilter - UABF) και νερό. Οι μονάδες που το αποτελούν κατασκευάζονται από ακρυλικούς θαλάμους, και γεμίζονται με άμμο.

Το Σχήμα 5.44 παρουσιάζει τις διατάξεις των μονάδων του UABF φίλτρου. Περισταλτικές αντλίες χρησιμοποιούνται για να τροφοδοτήσουν το βιοφίλτρο με τα υγρά απόβλητα. Στο κάτω μέρος του αντιδραστήρα, εγκαθίστανται κωνικές πλάκες διάχυσης για τροφοδοσία αέρα. Ο ρυθμός ροής αέρα είναι σχεδόν 10 φορές μεγαλύτερος από τον ρυθμό ροής λυμάτων. Ο αντιδραστήρας λειτουργεί μέχρι να επιτευχθεί η λειτουργία σταθερής κατάστασης. (Kemmadamrong Praphon, Ιούνιος 2000)

Σχήμα 5.44. Σχηματικό διάγραμμα του UABF φίλτρου



Πηγή: Kemmadamrong Praphon, Ιούνιος 2000

Ο Πίνακας 5.11 ανακεφαλαιώνει τα δεδομένα πέντε δοκιμών με διαφορετικό ρυθμό φορτίου, όπου παρατηρείται μείωση του COD. Η συνολική μείωση COD ποικίλει από 62 – 86%.

Πίνακας 5.11. Χαρακτηριστικά απόδοσης φίλτρου UABF

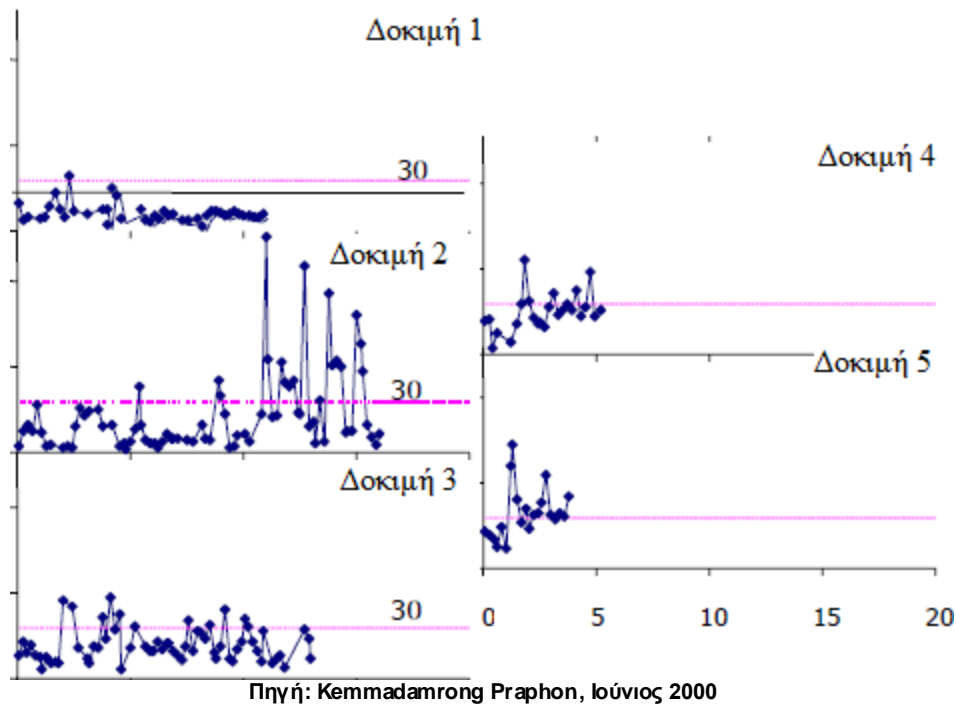
Αριθμός δοκιμών	Ρυθμός φορτίου $\text{kg COD/m}^3 \cdot \text{d}$	%TCOD μείωση
1	0.40	86
2	0.61	74
3	1.20	66
4	2.43	67
5	4.57	62

Πηγή: Kemmadamrong Praphon, Ιούνιος 2000

Η μεγαλύτερη μείωση του COD συμβαίνει στο αρχικό ύψος του αντιδραστήρα και λίγη επιπρόσθετη αφαίρεση επιτυγχάνεται στο υπόλοιπο. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός οι πιο εύκολα βιοαποδομήσιμες ουσίες αποσυντέθηκαν στην αρχή του φίλτρου κοκ.

Το Σχήμα 5.45 δείχνει την μεταβολή των συγκεντρώσεων των αιωρούμενων στερεών στα απόβλητα και φαίνεται ότι οι τιμές τους ήταν σχεδόν κάτω από τα 30 mg / l. Αυτό σημαίνει το UABF φίλτρο δεν χρειάζεται δεξαμενή καθίζησης.

Σχήμα 5.45. Συγκέντρωση αιωρούμενων στερεών στα απόβλητα για κάθε δοκιμή



6.5.2.3.6 Εμβαπτισμένο βιολογικό αεριζόμενο φίλτρο

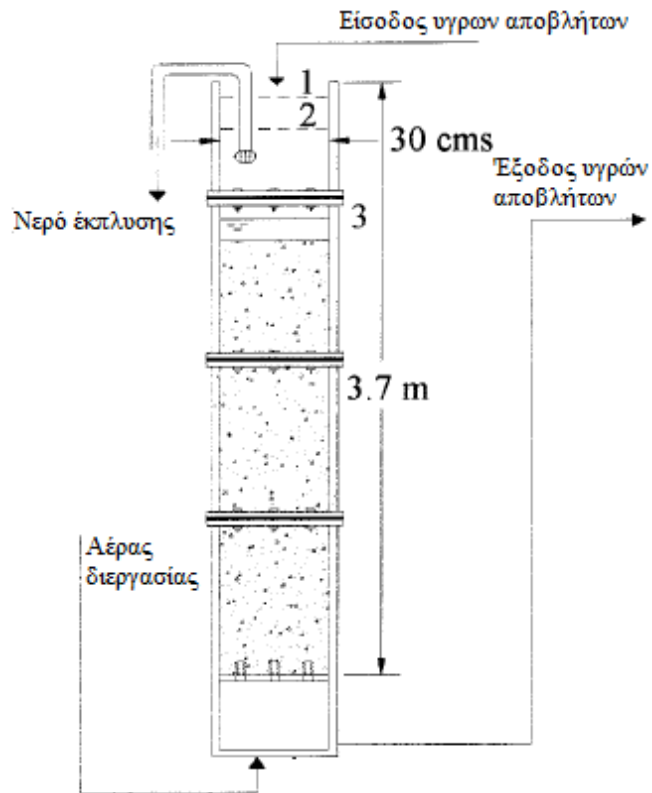
Τα εμβαπτισμένα βιολογικά αεριζόμενα φίλτρα (submerged biologic aerated filters - BAFs) είναι μία τεχνολογία με ικανότητα επεξεργασίας λυμάτων. Αυτό το σύστημα απαιτεί μεγάλου όγκου αντιδραστήρες για την αντιμετώπιση απαιτητικών ρύπων. Οι πρώτες μονάδες κατασκευάστηκαν στην αρχή του 1980.

Τα κύρια πλεονεκτήματα των εμβαπτισμένων αεριζόμενων φίλτρων είναι:

- Μεγάλη ευελιξία διαχείρισης φόρου ρύπων.
- Απαιτείται μικρότερη έκταση σε σχέση με συστήματα ενεργούς ιλύος.
- Αρθρωτή κατασκευή, που επιτρέπει απλή προσαρμογή.
- Παραγωγή λιγότερου θορύβου και οσμών.

Το σύστημα αποτελείται από μία πολυμεθακρυλική στήλη που δρα ως δοχείο για το υλικό στήριξης των εμβαπτιζόμενων υλικών (Σχήμα 5.46). (Osorio Francisco)

Σχήμα 5.46. Σχηματικό διάγραμμα βιοφίλτρου



- 1) Επίπεδο νερού μετά την έκπλυση
- 2) Επίπεδο έναρξης έκπλυσης
- 3) Επίπεδο έναρξης λειτουργίας

Πηγή: Osorio Francisco

Στην συγκεκριμένη μέθοδο, το μέσο στήριξης προέρχεται από τη βιομηχανία κεραμικών (Εικόνα 5.1). Το μέσο φτιάχνεται από άλεση απόβλητων υλών για να γίνει κατάλληλο για την χρήση του.

Εικόνα 5.1. Κεραμικό υλικό ως υλικό στήριξης

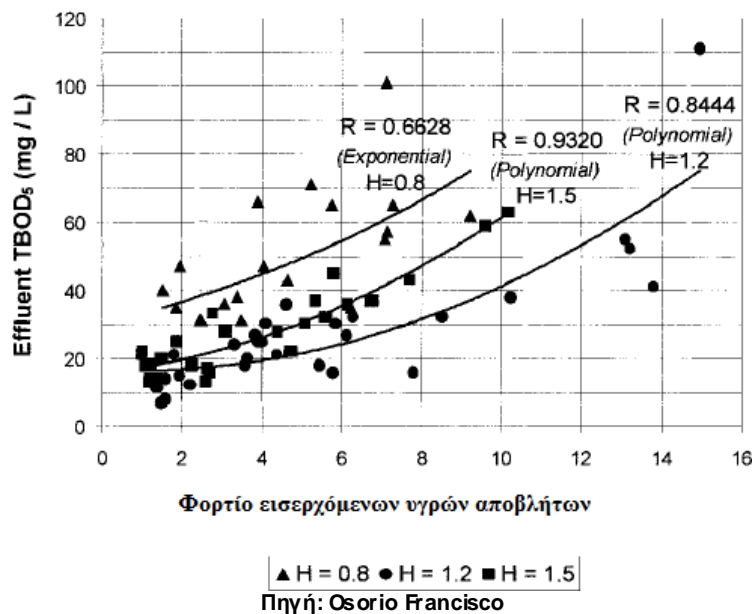


Πηγή: Osorio Francisco

Τρεις διαφορετικές λειτουργικές φάσεις δοκιμάστηκαν, η κάθε μία χρησιμοποιώντας διαφορετικό στρώματος υλικού: 0.8, 1.2 και 1.5 m. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.47, το ύψος $H = 1.2$ m παρήγαγε τις χαμηλότερες τιμές σε συγκέντρωση BOD στο διάλυμα ανάμεσα στα διαφορετικά ύψη. Αρχικά, βγήκε το συμπέρασμα ότι τα 0.8 m ήταν ένα ανεπαρκές ύψος στρώματος υλικού.

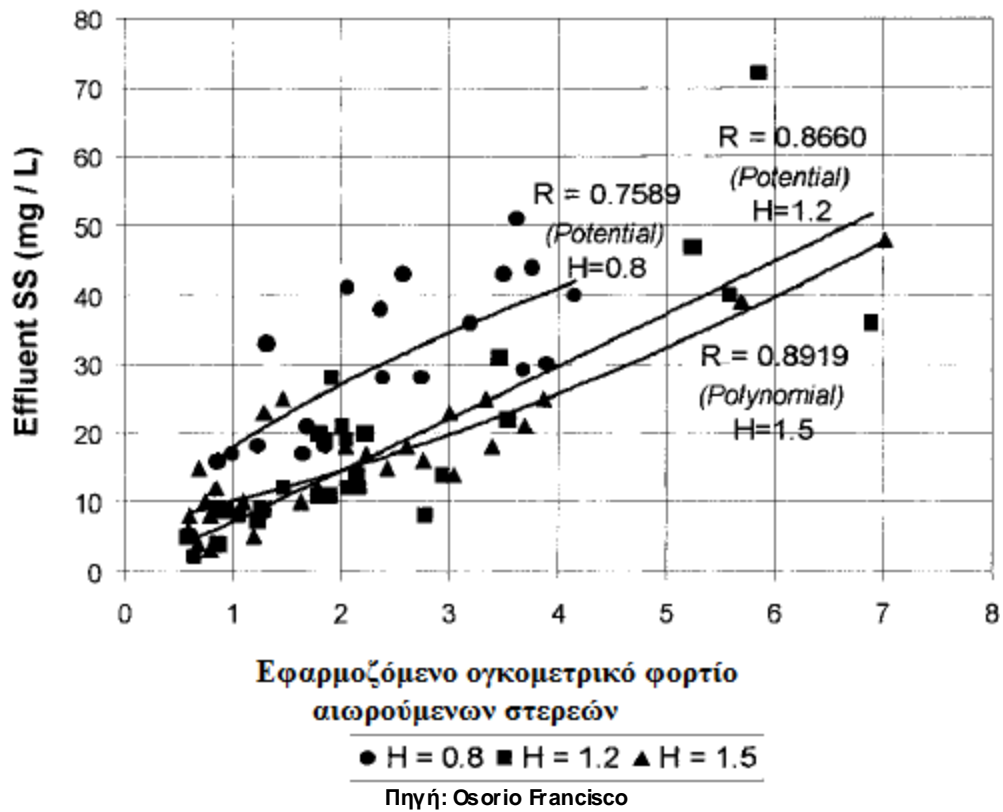
Είναι ενδιαφέρον που ένα χαμηλότερο ύψος υλικού ($H = 1.2$ m) δίνει χαμηλότερες συγκεντρώσεις BOD από το μεγαλύτερο ($H = 1.5$ m). Όμως, αναμενόταν ότι με ένα μεγαλύτερο ύψος, παίρνονται καλύτερα αποτελέσματα BOD και σε κάθε περίπτωση το σύστημα θα έφθανε σε ένα συγκεκριμένο ύψος πάνω από το οποίο καμία ουσιαστική βελτίωση δεν γίνεται. Το γεγονός ότι ένα χαμηλότερο ύψος δίνει καλύτερα αποτελέσματα ήταν μία απρόβλεπτη ανακάλυψη.

Σχήμα 5.47. Σχέση συγκέντρωσης BOD εξερχόμενων αποβλήτων με εισερχόμενων όσον αφορά το ύψος στρώματος υλικού



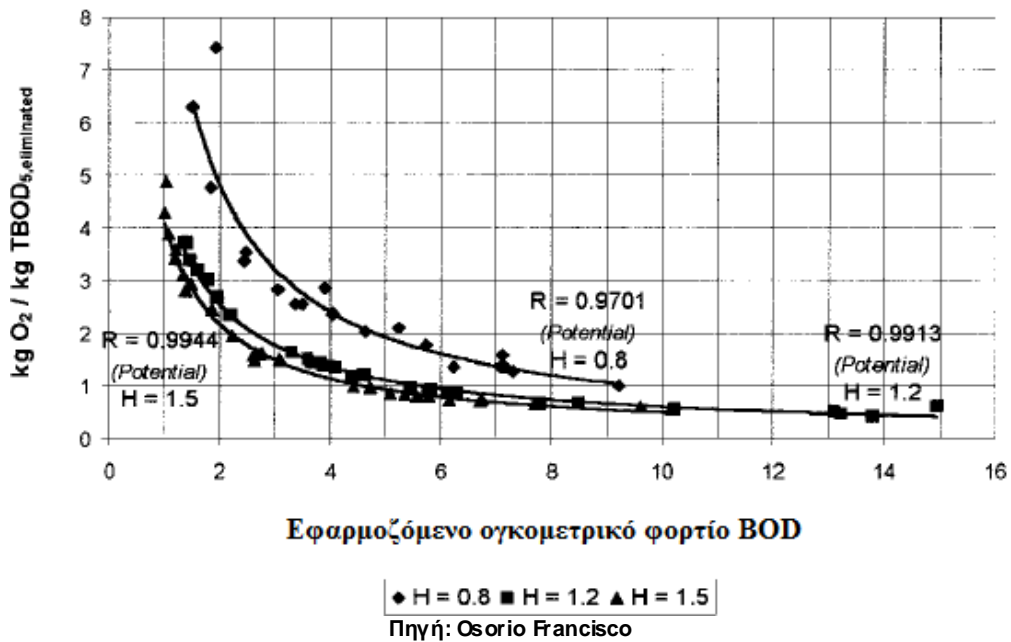
Για το ύψος στρώματος των 1.5 m, ένα ογκομετρικό φορτίο αιωρούμενων στερεών $5.33 \text{ kg} / \text{m}^3$ / ημέρα ή λιγότερο προκύπτει στις συγκεντρώσεις αποβλήτων που ακολουθούν την Ευρωπαϊκή Οδηγία. Αυτά τα αποτελέσματα φαίνονται στο Σχήμα 5.48. Αφού η λειτουργία αυτής της μεθόδου είναι το πέρασμα νερού μέσω ενός στρώματος υλικού που φιλτράρει, οι συγκεντρώσεις των αιωρούμενων στερεών ήταν άριστες. Το ύψος $H = 0.8$ m ήταν ανεπαρκές και αντίθετα από τα αποτελέσματα για το BOD, δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στην απόδοση του ύψους των 1.2 m ή των 1.5 m.

Σχήμα 5.48. Σχέση συγκέντρωσης αιωρούμενων στερεών στα εξερχόμενα απόβλητα με τα εισερχόμενα ανάλογα το ύψος στρώματος υλικού



Βασιζόμενοι στο Σχήμα 5.49, ένα ογκομετρικό φορτίο των 6.33 kg BOD / m³ / ημέρα αντιστοιχεί σε κατανάλωση 0.9 kg O₂.

Σχήμα 5.49. Σχέση κατανάλωσης οξυγόνου με το εφαρμοζόμενο ογκομετρικό φορτίο BOD σε εισερχόμενα απόβλητα ανάλογα το ύψος στρώματος υλικού



Επίσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.49, μία χαμηλότερη κατανάλωση οξυγόνου συμβαίνει με το υψηλότερο ύψος στρώματος, και αυτό γίνεται, χωρίς να φέρει απευθείας σχέση με τη μείωση των συγκεντρώσεων στην παράμετρο BOD. Αυτό δείχνει ότι το σύστημα αντιδρά προσπαθώντας να αντισταθμίσει τις ανεπάρκειες λόγω του ύψους με περίσσεια κατανάλωση οξυγόνου.

Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποκλειστικά δευτεροβάθμια επεξεργασία. Συμπεραίνεται ότι ένα χαμηλότερο ύψος στρώματος αντιστοιχεί σε υψηλότερη κατανάλωση οξυγόνου, που υποδηλώνει μεγαλύτερη παρουσία βιολογικών μεμβρανών με χαμηλότερα ύψη στρωμάτων. Το βέλτιστο ύψος στρώματος είναι ανάμεσα στα 1.2 και 1.5 m. Το $H = 1.2$ m πέτυχε αποδεκτές συγκεντρώσεις BOD. Για το ύψος $H = 1.5$ m, όλα τα δεδομένα τείνουν στις χαμηλότερες συγκεντρώσεις όλων των παραμέτρων και τέλος, τα 0.8 m θεωρούνται αναμφίβολα ανεπαρκή, όπως και τα 1,8 m περιττά.

6.5.2.3.7 Διεργασία ενεργούς ιλύος

Η εξωτερική επεξεργασία των λυμάτων πολτού και χάρτου συνήθως ξεκινά με στάδια πρωτοβάθμιας επεξεργασίας που περιλαμβάνουν την απομάκρυνση στερεών, ουδετεροποίηση, ψύξη και εξισορρόπηση. Πιθανές επεξεργασίες για απομάκρυνση στερεών είναι η καθίζηση και η επίπλευση. Υψηλή αφαίρεση στερεών πάνω από 80% επιτυγχάνεται με πρωτοβάθμια επεξεργασία. Όμως, η ελλιπής απομάκρυνση οργανικής ύλης απαιτεί δευτεροβάθμια επεξεργασία.

Οι μύλοι πολτού και χαρτιού που έχουν περιορισμένο χώρο και ευαίσθητους δέκτες χρησιμοποιούν τη διεργασία ενεργούς ιλύος για βιολογική επεξεργασία. Η ενεργός ιλύς, που έχει δώσει σε αυτό το είδος διεργασίας το όνομα, είναι συνήθως μία παχύρρευστη λάσπη χρώματος καφέ που αποτελείται από μικροοργανισμούς. Η βασική διεργασία ενεργούς ιλύος αποτελείται από δύο στάδια: έναν αεριζόμενο αντιδραστήρα (αερισμός) και η ιλύς κρατείται σε δεξαμενή καθίζησης για διαχωρισμό αερίων – στερεών και ανακυκλώνει την ροή με την επιστροφή των διαχωρισμένων στερεών πίσω στον αντιδραστήρα. Η διεργασία εμφανίζεται στο Σχήμα 5.50. Στο πρώτο στάδιο, τα λύματα επεξεργάζονται με υψηλή συγκέντρωση μικροοργανισμών και ένα ισχυρό αερισμό, και ο χρόνος εκτέλεσης μπορεί να ποικίλλει από μερικές ώρες μέχρι και μία μέρα. Στο δεύτερο στάδιο, το νερό και η ιλύς διαχωρίζεται σε μία λεκάνη καθίζησης και μέρη της ιλύος αντλούνται πίσω στη λεκάνη αερισμού. Η επανακυκλοφορία της ιλύος επιτρέπει μία υψηλή συγκέντρωση μικροοργανισμών που είναι σημαντικό για την εκτενή μείωση της οργανικής ύλης. Τα συστήματα ενεργούς ιλύος είναι περισσότερο ευαίσθητα από τις αεριζόμενες δεξαμενές και δεν αντέχει γρήγορες αλλαγές φορτίου. Όμως, ο βαθμός αποτελεσματικότητας μπορεί να ελεγχθεί, και μεγάλες υψηλές μειώσεις BOD μπορούν να επιτευχθούν. (Talat Mahmood, 2006)

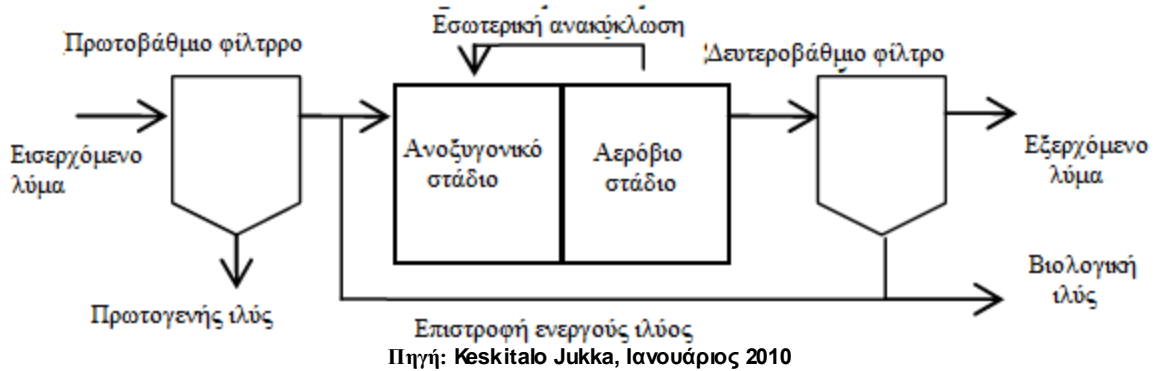


Πηγή: Talat Mahmood, 2006

Όλες οι διεργασίες για βιολογική απομάκρυνση αζώτου απαιτούν μία αερόβια ζώνη για νιτροποίηση και μία ανοξυγονική ζώνη που ολοκληρώνει την αφαίρεση αζώτου με απονίτρωση. Οι διεργασίες ομαδοποιούνται σύμφωνα με την τοποθεσία της ανοξυγονικής ζώνης σε προανοξυγονικές, μεταανοξυγονικές και ταυτόχρονες διεργασίες νιτροποίησης – απονίτρωσης. Η προανοξυγονική

διεργασία χρησιμοποιείται πιο συχνά και φαίνεται στο Σχήμα 5.51. Σε αυτήν, το νιτρικό άλας τροφοδοτείται στον ανοξυγονικό αντιδραστήρα με εσωτερική ανακύκλωση από τον αερόβιο και με επιστροφή ενεργούς ιλύος από το δευτεροβάθμιο φίλτρο. (Keskitalo Jukka, Ιανουάριος 2010)

Σχήμα 5.51. Προανοξυγονική διεργασία για βιολογική αφαίρεση αζώτου



Η βιολογική απομάκρυνση φωσφόρου επιτυγχάνεται με μία αναερόβια ζώνη ακολουθούμενη από μία αερόβια.

Αυτό το σύστημα επεξεργασίας χρησιμοποιείται για την αφαίρεση COD, BOD, αιωρούμενων στερεών και AOX.

6.5.2.3.8 Μεσοφιλική και θερμοφιλική βιολογική επεξεργασία

Τα λύματα της βιομηχανίας πολτού και χάρτου παραδοσιακά επεξεργάζονται από αερόβια μεσοφιλική επεξεργασία (25 – 30°C) παρά της υψηλής θερμοκρασίας τους (55°C) στους σημερινούς μύλους. Η υψηλής θερμοκρασίας (θερμοφιλική) βιολογική επεξεργασία φαίνεται να είναι υποσχόμενη και οικονομική επιλογή για την αντιμετώπιση των πιο ζεστών λυμάτων. Εκτός του ότι δεν χρειάζεται το στάδιο ψύξης, αυτή η προσέγγιση έχει το πιθανό πλεονέκτημα παροχής αποτελεσματικής και γρήγορης επεξεργασίας με ελάχιστη ενέργεια και λειτουργικά κόστη όπως και μειωμένη παραγωγή ιλύος.

Παρόλο ότι η θερμοφιλική χώνευση (αερόβια και αναερόβια) της ιλύος έχει μελετηθεί και εφαρμοστεί σε διάφορα επίπεδα, η θερμοφιλική βιολογική επεξεργασία (αερόβια και αναερόβια) των λυμάτων έχει λάβει μικρή προσοχή και οι σημερινές εγκαταστάσεις είναι μάλλον σπάνιες.

Οι βιολογικές διεργασίες είναι γνωστές ως εξαρτώμενες από τη θερμοκρασία. Όμως, συμπερασματικά πειραματικά δεδομένα δεν υπάρχουν για την επιρροή της θερμοκρασίας στην απόδοση της μεθόδου επεξεργασίας, ειδικά στις υψηλότερες θερμοκρασίες αερόβιων συστημάτων. Γενικά, συστήματα επεξεργασίας αποβλήτων λειτουργούν στο μεσοφιλικό εύρος των 25 – 38 °C, αλλά είναι γνωστό ότι τα βιολογικά συστήματα μπορούν επίσης να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες υψηλές όπως 40 – 65 °C (θερμοφιλικό εύρος). Οι θερμοφιλικές διεργασίες μπορούν επίσης να σημαίνουν υψηλότερους ρυθμούς μεταβολικής αντίδρασης (γρηγορότερη διεργασία) και μικρότερη παραγωγή ιλύος από τη μεσοφιλική διεργασία.

Σε κάποιες περιπτώσεις, η θερμοφιλική διεργασία περιγράφεται ως γρηγορότερη, πιο οικονομική, και πιο αποτελεσματική από τη μεσοφιλική (Sindala και Parker, 1970), αλλά άλλοι ερευνητές (Gehm, 1956) δεν βρίσκουν διαφορές όσον αφορά την αποτελεσματικότητα μείωσης οργανικών ρύπων. Η θεωρία επίσης υποστηρίζει ότι με υψηλότερη θερμοκρασία, παρουσιάζεται υψηλότερος ρυθμός αντίδρασης. Σύμφωνα με την εξίσωση Van't Hoff – Arrhenius, οι ρυθμοί βιοχημικής αντίδρασης σχεδόν διπλασιάζονται με κάθε αύξηση θερμοκρασίας κατά 10 °C. Όμως, το θερμοκρασιακό εύρος στο οποίο ο κανόνας αυτός εφαρμόζεται είναι μικρός και τελικά, στις περισσότερες περιπτώσεις, οι ρυθμοί αντίδρασης μειώνονται με αυξανόμενες θερμοκρασίες. Ο

Gaughran (1947) βρήκε ότι ο ρυθμός ανάπτυξης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας μέχρι τους 55 °C, πάνω από τους οποίους ο ρυθμός μειώνεται. Εκτός από γρηγορότερη επεξεργασία, η θερμοφιλική διεργασία στους 55 °C είναι καλύτερη από τη μεσοφιλική όσον αφορά τη συνολική αφαίρεση BOD, COD και αιωρούμενων σωματιδίων.

6.5.3 Συστήματα φυσικοχημικού καθαρισμού

Τα λύματα από τη λεύκανση πολτού είναι υπεύθυνα για το περισσότερο χρώμα, την οργανική ύλη, και τοξικότητα των υδάτινων εκκενώσεων. Ο πολτός που παράγεται από χημική πολτοποίηση απαιτεί λεύκανση για την παραγωγή ανοιχτόχρωμων πολτών. Αυτές οι λειτουργίες παράγουν υψηλό περιβαλλοντικό φορτίο, όπως BOD, COD, χρώμα και ποικίλλες χλωριωμένες ενώσεις (φαινόλες, ρητινικά και λιπαρά οξέα, και διοξίνες και φουράνες προερχόμενες από τη λιγνίνη) στα λύματα λεύκανσης που ορίζονται ως AOX. Κάποιες από αυτές τις χλωριωμένες ενώσεις είναι τοξικές, βιοσυσσωρεύσιμες, μεταλλαξιόνες και ανθεκτικές στην βιοαποδόμηση. Έτσι, αυτές οι ενώσεις απειλούν το περιβάλλον. Οι AOX στα λύματα λεύκανσης προέρχονται από την χλωρίωση της εναπομείνουσας λιγνίνης στον πολτό. Έτσι, το στάδιο προλεύκανσης, για παράδειγμα η απολιγνίνωση με οξυγόνο, που μειώνει τον αριθμό Κάπα του πολτού, μειώνει τις AOX. Η αντικατάσταση του μοριακού χλωρίου από διοξείδιο του χλωρίου στη ECF λεύκανση μειώνει την ποσότητα παραγόμενων χλωριωμένων ενώσεων.

Οι σταθμοί λεύκανσης παγκοσμίως χρησιμοποιούν τις εξής δύο προσεγγίσεις για έλεγχο ρύπανσης:

- Αλλαγές διεργασιών όπως εκτεταμένη απολιγνίνωση και αντικατάσταση του χλωρίου στη λεύκανση από μοριακό οξυγόνο, όζον ή υπεροξείδιο του υδρογόνου.
- Επεξεργασία αποβλήτων από φυσικό – χημικές διεργασίες, όπως χημική οξειδωση κτλ.

Συμβατικά, οι βιολογικές επεξεργασίες, συμπεριλαμβανομένων της ενεργούς ιλύος και των αεριζόμενων δεξαμενών, βοηθούν στην αποσύνθεση των απόβλητων ενώσεων σε διοξείδιο του άνθρακα πριν την εκκένωση τους στο περιβάλλον. Αποτελεσματικές δευτεροβάθμιες επεξεργασίες μπορούν να μειώσουν την οργανική περιεκτικότητα των λυμάτων μύλου πολτού σημαντικά, αλλά η απόδοση σταθμών βιολογικής διεργασίας περιορίζεται λόγω της ύπαρξης βιολογικά ανθεκτικής οργανικής ύλης που βρίσκονται ευρέως στα τελικά λύματα.

Οι διεργασίες προηγμένης οξειδωσης που συμπεριλαμβάνουν και τον οζονισμό είναι ανάμεσα σε ένα πλήθος υποσχόμενων τεχνολογιών για την επεξεργασία αρκετών ρύπων. Η ικανότητα αυτών των διεργασιών όσον αφορά την αλλαγή της μοριακής δομής των οργανικών ενώσεων έχει οδηγήσει στη θεωρία ότι ο συνδυασμός τους με τη συμβατική βιολογική επεξεργασία μπορεί να είναι αποτελεσματικός στην αφαίρεση μίας μεγάλης ποσότητας οργανικών ενώσεων από τα λύματα. Επιπλέον, η ικανότητά τους για την αφαίρεση χρώματος τις κάνει υποψήφιες για την επεξεργασία.

Η επεξεργασία μεμβρανών μαζί με υπερδιήθηση κυρίως χρησιμοποιείται σαν ένα στάδιο επεξεργασίας για τον διαχωρισμό των οργανικών ενώσεων από τα λύματα. Οι διαχωρισμένες ενώσεις σχηματίζουν ένα πιο συγκεντρωμένο ρεύμα με μικρότερο όγκο, και επομένως απαιτούν ένα μικρότερο αντιδραστήρα για περεταίρω επεξεργασία.

6.5.3.1 Προηγμένη οξείδωση υγρών αποβλήτων με φωτοκατάλυση με διοξείδιο του τιτανίου (TiO₂)

Οι συμβατικές μέθοδοι επεξεργασίας των λυμάτων δεν είναι αποτελεσματικές για την πλήρη αποσύνθεση του χρώματος και των χλωριωμένων οργανικών ενώσεων χαμηλού μοριακού βάρους. Επίσης, παρόλο που η οργανική ύλη είναι υψηλά βιοαποδομήσιμη, οι αρχικές τιμές των BOD και COD είναι τόσο υψηλές που ένας συμβατικός βιολογικός αντιδραστήρας δεν μπορεί να εφαρμοστεί. Ένας

συνδυασμός δύο βιολογικών σταδίων, αποτελούμενων από την ακολουθιακή εφαρμογή μιας αναερόβιας και μίας αερόβιας επεξεργασίας, χρησιμοποιείται. Όμως, αυτό προκαλεί μία συσσώρευση μη βιοαποδομήσιμου κλάσματος οργανικών ουσιών στο νερό.

Έτσι, υπάρχει ανάγκη να υιοθετηθούν κάποιες προηγμένες διεργασίες οξειδωσης (ΠΔΟ). Οι ΠΔΟ βασίζονται στην επιτόπια παραγωγή πολύ ενεργών οξειδωτικών ειδών, για παράδειγμα ρίζες υδροξυλίου (OH^\cdot), για την αποσύνθεση των οργανικών ενώσεων. Η παραγωγή τους μπορεί να επιταχυνθεί συνδυάζοντας διάφορα συστήματα, όπως UV/ καταλύτη, UV / καταλύτη / H_2O (φωτοκατάλυση αγωγού), O_3 (οζονισμός), UV / O_3 , UV / H_2O_2 , O_3 / H_2O_2 , UV / O_3 / H_2O_2 , UV / O_3 / καταλύτη κτλ. Ανάμεσα στις ποικίλες ΠΔΟ, η ημιαγωγική φωτοκατάλυση είναι μία ελκυστική τεχνική επειδή προκαλεί την πλήρη μετατροπή ενός εύρους οργανικών ενώσεων σε ανόργανες χωρίς περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Το TiO_2 είναι ο ευρέως χρησιμοποιούμενος ημιαγωγός – φωτοκαταλύτης για επεξεργασία των λυμάτων επειδή είναι χημικά και βιολογικά αδρανές, φωτο – ευσταθές σε μεγάλο εύρος του pH, και σχετικά εύκολο στην παραγωγή και χρήση.

Η φωτοκατάλυση βασίζεται στην απορρόφηση ακτινοβολίας φωτός από σωματίδιο ημιαγωγού. Όταν ένα φωτόνιο ($h\nu$, $1 < 390 \text{ nm}$) χτυπά στην επιφάνεια καταλύτη, ένα ηλεκτρόνιο e^- μεταφέρεται από τη ζώνη σθένους (v_b) στη ζώνη αγωγιμότητας (c_b) αφήνοντας πίσω μία οπή ($h_{v_b}^+$). Η $h_{v_b}^+$ μπορεί είτε απευθείας να οξειδώσει μία ευρεία περιοχή προσροφήσιμων ρύπων ή να παράγει ρίζες OH, οι οποίες μπορούν να οξειδώσουν οργανικές ουσίες μη επιλεκτικά. Το e^- απευθείας ενώνεται με το προσροφήσιμο O_2 για την παραγωγή ριζών υπεροξειδίου. Αυτές μπορούν να συμμετέχουν περαιτέρω σε αντιδράσεις αποσύνθεσης ρύπων.

Έχει αποδειχθεί ότι η διαδοχική βιολογική και φωτοκαταλυτική επεξεργασία έχει ως αποτέλεσμα την πλήρη αποσύνθεση λυμάτων λεύκανσης όσον αφορά το COD, το χρώμα και τις χλωροφαινόλες.

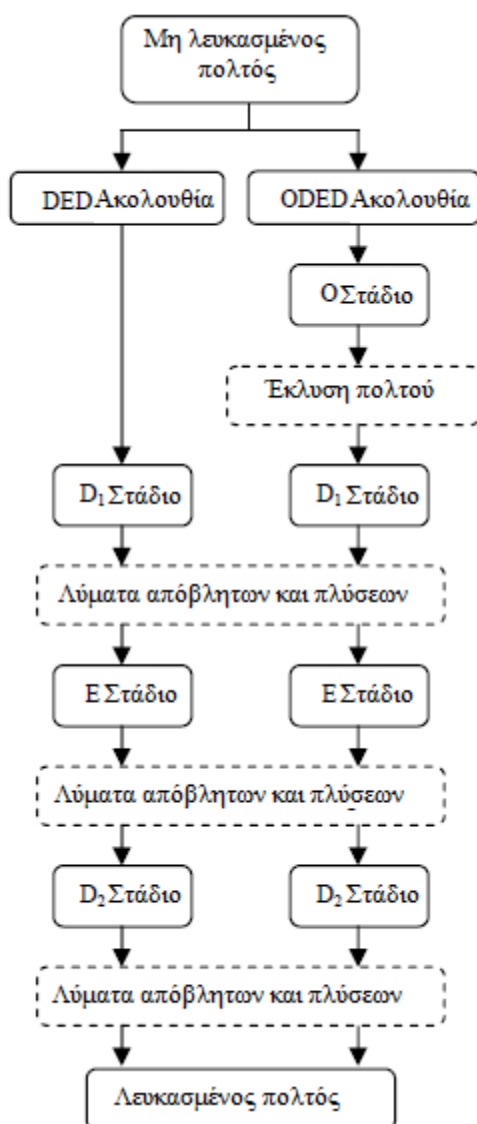
Η λεύκανση του πολτού γίνεται μέχρι να επιτευχθεί το 87% της φωτεινότητας του πολτού που είναι ISO στόχος με τις ακολουθίες DED και ODED: όπου D,E και O αναφέρονται στην οξείδωση με διοξειδίο του χλωρίου, εξαγωγή αλκαλίου με NaOH και απολιγνίνωση με οξυγόνο αντίστοιχα. Ο Πίνακας 5.12 και το Σχήμα 5.52 δείχνουν το διάγραμμα ροής της διεργασίας λεύκανσης πολτού για τις ακολουθίες DED και ODED. Πριν τη λεύκανση και την απολιγνίνωση, ο ξηραμένος πολτός τοποθετείται σε νερό και διαλύεται για 4 – 5 min χρησιμοποιώντας ένα διαμελιστή πολτού. Έπειτα, φιλτράρεται και υπόκεινται σε απολιγνίνωση με οξυγόνο σε δοχείο όπου υπάρχει διάλυμα αιθανοδιόλης. Μετά, ο πολτός πλένεται σε κόσκινο, πιέζεται, ξηραίνεται με αέρα και τα χημικά λεύκανσης προστίθενται. Μετά την ολοκλήρωση της αντίδρασης, η ύψ του πολτού φιλτράρεται και πλένεται. (Kumar P., Οκτώβριος 2012)

Πίνακας 5.12. Συνθήκες λεύκανσης πολτού για διάφορα στάδια

Παράμετροι	DED Ακολουθία			ODED Ακολουθία			
	D ₁	E	D ₂	O	D ₁	E	D ₂
Αριθμός Κάπα		15			15 (μετά το O στάδιο 8.3)		
Παράγοντας Κάπα		0.35			0.30		
Ζήτηση Cl ₂ (%)	70	-	30	-	70	-	30
NaOH (%)	-	0.7	-	2	-	0.7	-
Ακρίβεια (%)	10	10	10	10	10	10	10
Τέλος pH	3.4	11.5	3.5	-	3.5	11.4	3.2
Θερμοκρασία (C)	70	70	70	100	70	70	70
Χρόνος (h)	180	90	180	75	180	90	180
Φορτίο O ₂ (kg/cm ²)	-	-	-	6	-	-	-
Ευκρίνετα ISO)	(%	87			87		

Πηγή: Kumar P., Οκτώβριος 2012

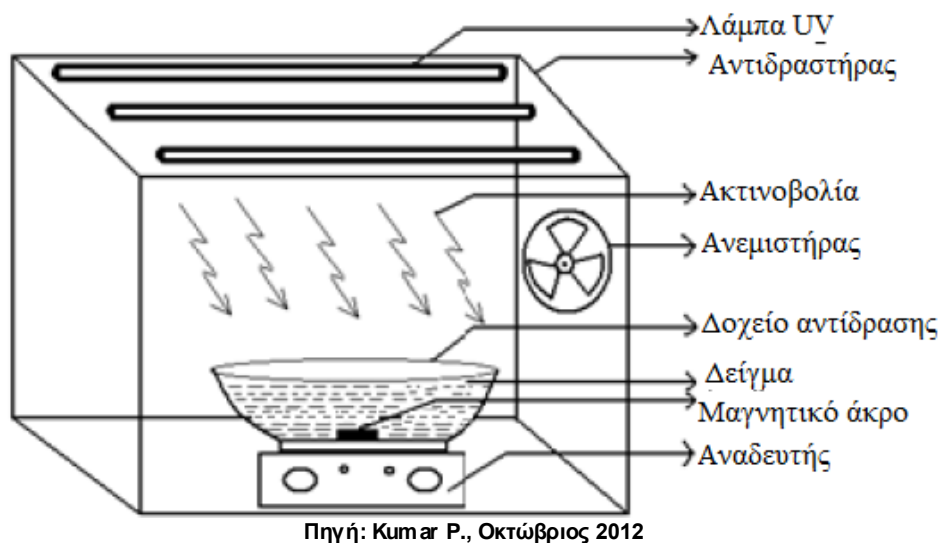
Σχήμα 5.52. Διάγραμμα ροής της διεργασίας λεύκανσης πολτού



Πηγή: Kumar P., Οκτώβριος 2012

Η φωτοαποσύνθεση γίνεται σε δοχείο από βιοπυριτικό γυαλί (Σχήμα 5.53). Το δοχείο που περιέχει το μίγμα αντίδρασης τοποθετείται σε UV αντιδραστήρα. Το μίγμα υπόκειται σε ακτινοβολία υπό UV φως με συνεχή ανάδευση.

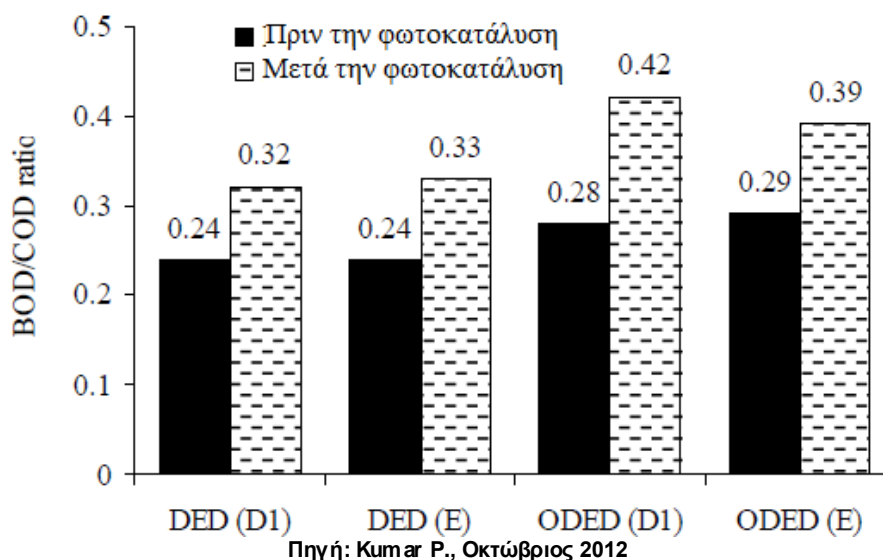
Σχήμα 5.53. Φωτοαντιδραστήρας για προηγμένη οξειδωση λευκασμένων λυμάτων



Λύμα λεύκανσης πολτού σταθεροποιείται σε pH 7 και τοποθετείται στο δοχείο. Προστίθεται TiO_2 και οι λάμπες UV ανάβουν. Μετά την ολοκλήρωση της αντίδρασης, η έλλειψη νερό αποκαθίσταται με αποσταγμένο νερό και επιτρέπεται η καθίζηση.

Τα μέσα χαρακτηριστικά των λυμάτων λεύκανσης παρουσιάζεται στον Πίνακα 5.13. Η φωτοκατάλυση με TiO_2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί ουσιαστικά για την επεξεργασία αποβλήτων λεύκανσης πολτού. Υψηλότερη απομάκρυνση ρύπων επιτεύχθηκε για απόβλητα ακολουθίας ODED σε σχέση με την DED. Τα στάδια D₁ και E των λυμάτων της ακολουθίας DED παρουσιάζουν υψηλό οργανικό φορτίο όσον αφορά τα BOD, COD, χρώμα και AOX σε σύγκριση με την ODED. Ο δείκτης βιοαποδομησιμότητας των αποβλήτων βελτιώνεται μετά την φωτοκατάλυση όπως φαίνεται και στη Σχήμα 5.54.

Σχήμα 5.54. Αλλαγή στον λόγο BOD/ COD για τα στάδια D₁ και E για τις ακολουθίες DED και ODED



Αυτό δείχνει εύκολη αφαίρεση ρύπων στην βιολογική επεξεργασία. Η φωτοκατάλυση έχει μία ισχυρή πιθανότητα για μεγάλου εύρους βιομηχανική εφαρμογή χρησιμοποιώντας ηλιακό φως σαν οικονομική πηγή ακτινοβολίας.

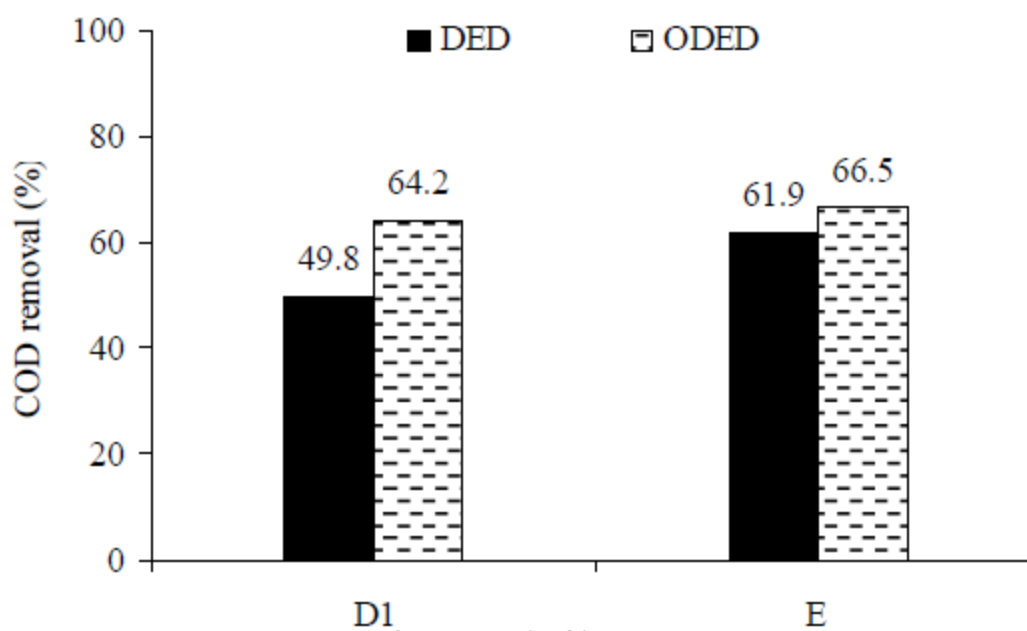
Πίνακας 5.13. Χαρακτηριστικά των λυμάτων λεύκανσης

Παράμετροι	DED Ακολουθία			ODED Ακολουθία		
	D ₁	E	D ₂	D ₁	E	D ₂
COD (mg/L)	1053	853	200	431	340	106
BOD (mg/L)	253	205	60	121	99	51
AOX (mg/L)	21.3	18.7	4.7	10.7	9.3	2.6
Χρώμα (mg Pt/L)	1040	1227	86	122	133	62
pH	3.4	11.5	3.5	3.5	11.4	3.2

Πηγή: Kumar P., Οκτώβριος 2012

Μετά από επεξεργασία 4 ωρών, 49.8% και 64.2% αφαίρεση COD για το στάδιο D₁, και 61.9% και 66.5% για το στάδιο E και για τις δύο ακολουθίες επιτεύχθηκε (Σχήμα 5.55).

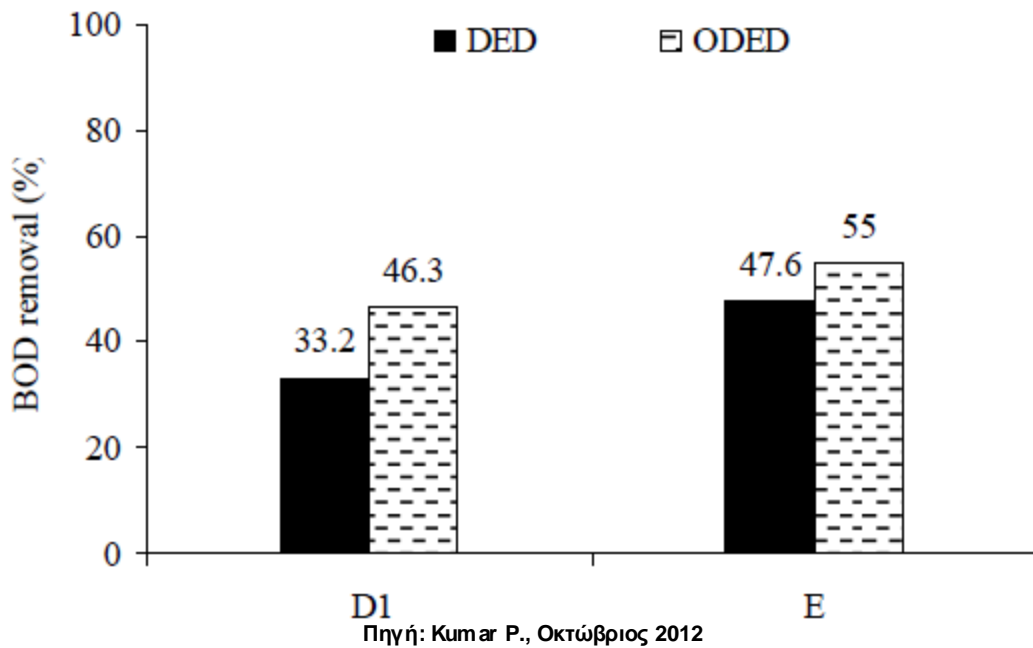
Σχήμα 5.55. Αφαίρεση COD (%) για τα στάδια D₁ και E για τις ακολουθίες DED και ODED



Πηγή: Kumar P., Οκτώβριος 2012

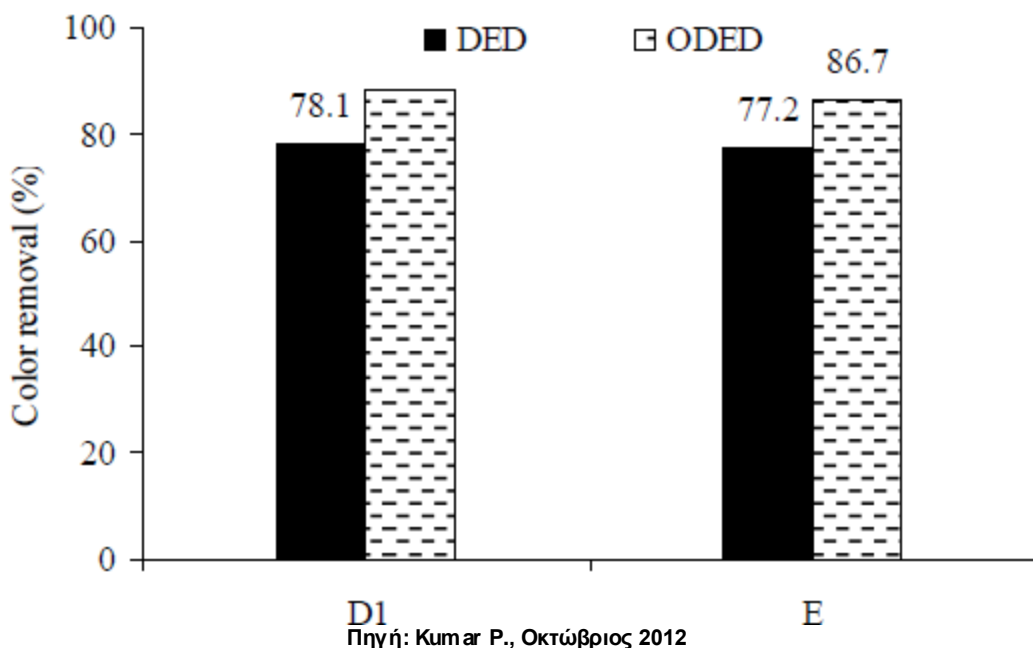
Επίσης, και στο BOD παρουσιάζεται μείωση στα συγκεκριμένα στάδια όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.56.

Σχήμα 5.56. Αφαίρεση BOD (%) για τα στάδια D₁ και E για τις ακολουθίες DED και ODED



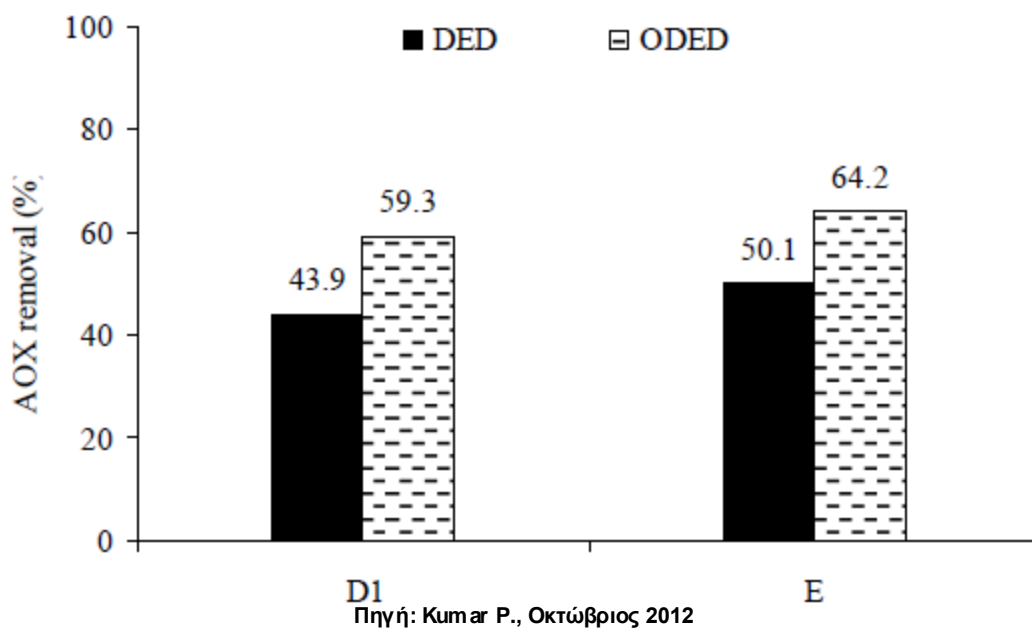
Το Σχήμα 5.57 δείχνει την αφαίρεση χρώματος με την χρήση φωτοκατάλυσης για τις δύο ακολουθίες. Το χρώμα στην ακολουθία ODED ήταν ήδη αρκετά μειωμένο σε σχέση με την DED.

Σχήμα 5.57. Αφαίρεση χρώματος (%) για τα στάδια D₁ και E για τις ακολουθίες DED και ODED



Οι ενώσεις AOX αποτελούν μία σχετική μέτρηση των χλωριωμένων οργανικών ενώσεων που περιέχονται στα λύματα λεύκανσης πολτού και της τοξικότητας, οι οποίες πρέπει να μειωθούν. Μετά από τις τέσσερις ώρες επεξεργασίας, η αφαίρεση AOX που καταγράφηκε ήταν 43.9% και 50.1% για το στάδιο D₁, και 59.3% και 64.2% για το στάδιο E και για τις δύο ακολουθίες (Σχήμα 5.58).

Σχήμα 5.58. Αφαίρεση AOX (%) για τα στάδια D₁ και E για τις ακολουθίες DED και ODED

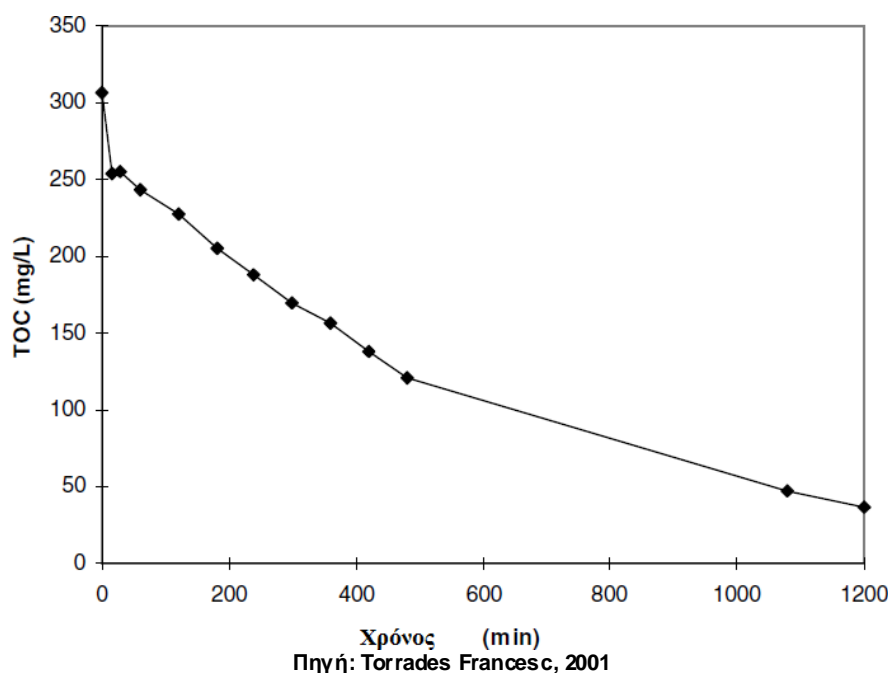


6.5.3.2 Ετερογενής φωτοκατάλυση και όζον

Φωτοκατάλυση ή / και σε συνδυασμό με όζον εφαρμόζεται στα απόβλητα της λεύκανσης και σε περίπτωση που αυτά φέρουν μεγάλα φορτία ρύπανσης, πριν τις τεχνικές που αναφέρθηκαν εφαρμόζεται και η υδρόλυση.

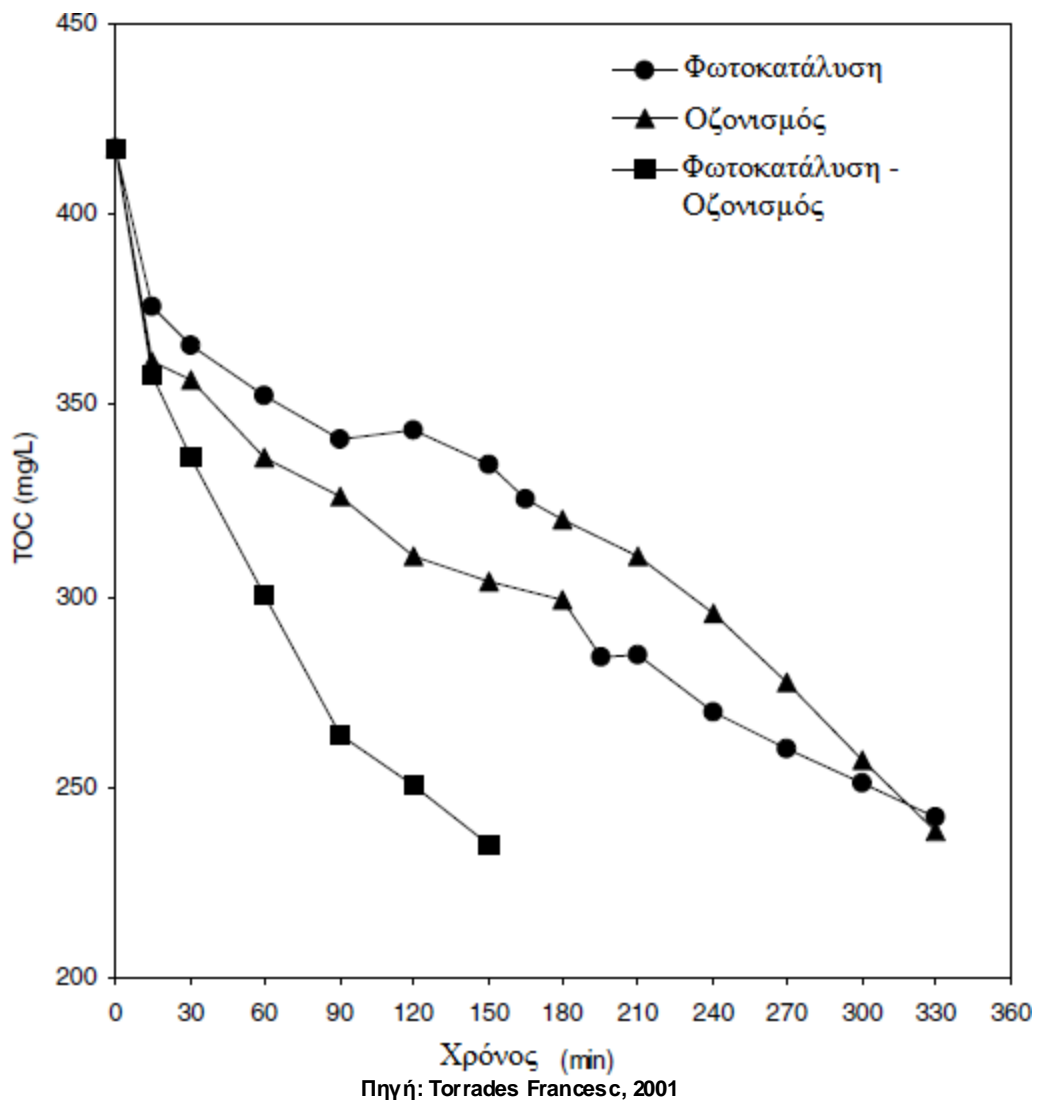
Η υδρόλυση ακολουθούμενη από τη φωτοκατάλυση προκαλεί μείωση στον οργανικό άνθρακα κατά 70%. Η απομάκρυνση του άνθρακα επιτυγχάνεται με ταυτόχρονη χρήση οζονισμού και φωτοκατάλυσης. Αυτός ο συνδυασμός βελτιώνει την αφαίρεση άνθρακα. Στο Σχήμα 5.59, εμφανίζονται οι αλλαγές στον ολικό οργανικό άνθρακα, καθώς τα λύματα υπόκεινται τη συμβατική φωτοκατάλυση. Όπως φαίνεται, επιτεύχθηκε 88% μείωση οργανικού άνθρακα. (Torrades Francesc, 2001)

Σχήμα 5.59. Μείωση ολικού οργανικού άνθρακα με τη συμβατική φωτοκατάλυση



Η ταυτόχρονη εφαρμογή οζονισμού και φωτοκατάλυσης προκαλεί την ίδια μείωση ρύπων όπως αν εφαρμοστεί πρώτα η φωτοκατάλυση και έπειτα ο οζονισμός ή αντίστροφα, αλλά σε μικρότερο χρόνο. Επίσης, όταν προηγείται η φωτοκατάλυση, αυτό ευνοεί τον οζονισμό, δίνοντας καλύτερα αποτελέσματα. Η μείωση του χρόνου αντίδρασης δηλώνει λιγότερη ζήτηση όζοντος και μείωση του κόστους. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν, παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.60. Όπως φαίνεται, μειώσεις περισσότερο από 80% στον οργανικό άνθρακα είναι εφικτές και στις τρεις ακολουθίες.

Σχήμα 5.60. Μείωση του ολικού οργανικού άνθρακα για συνδυασμό φωτοκατάλυσης και οζονισμού



Οι τιμές των AOX και COD μετά τις διαφορετικές επεξεργασίες φαίνονται στον Πίνακα 5.14. Σε όλες τις περιπτώσεις, η μείωση ξεπερνά το 85%. Ένα πλήρες αποχρωματισμένο λύμα προκύπτει και με τις τρεις μεθόδους ($O_3 - Ph$, $Ph - O_3$, $Ph + O_3$).

Πίνακας 5.14. Μείωση των AOX και COD για διάφορες τεχνικές στα λύματα λεύκανσης

	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΕΣ					
	Υδρόλυση	O ₃ (175 min)	O ₃ – Ph (330 min)	Ph (150 min)	Ph – O ₃ (330 min)	Ph + O ₃ (150 min)
AOX, mg/L	23	10.33	8.59	14	7.81	9.87
Μείωση, %	88	...	89	86
COD, mg/L	905	626	485	751	402	440
Μείωση, %	87	...	89	88
^a Ph: Φωτοκατάλυση	O ₃ : Επεξεργασία με όζον					

Πηγή: Torrades Francesc, 2001

Η ετερογενής φωτοκατάλυση και ο οζονισμός είναι γνωστές ως αποτελεσματικές τεχνικές για την καταστροφή χαμηλού επιπέδου οργανικών ρύπων σε υδάτινα συστήματα. Για απόβλητα με υψηλό φορτίο ρύπων που προκύπτουν από λεύκανση με διοξείδιο του χλωρίου, η καλύτερη τεχνική είναι αυτή που επωφελείται από μία αρχική υδρόλυση και την ταυτόχρονη εφαρμογή φωτοκατάλυσης και οζονισμού. Παρόμοια επίπεδα αφαίρεσης άνθρακα παρουσιάζονται στις ακολουθίες υδρόλυση – φωτοκατάλυση – οζονισμός και υδρόλυση – οζονισμός – φωτοκατάλυση, αλλά για μεγαλύτερους χρόνους αντίδρασης. Οι μειώσεις σε άνθρακα, COD και χλωριωμένες ενώσεις στα απόβλητα ήταν πάνω από 80% σε όλες τις περιπτώσεις, και τα απόβλητα ήταν πάντα πλήρως αποχρωματισμένα.

6.5.3.3 Ηλιακή φωτοκατάλυση

Η ηλιακή φωτοκατάλυση (Εικόνα 5.2) είναι μία προηγμένη διεργασία οξειδωσης και αποτελείται από τη χρήση ηλιακού φωτός για την παραγωγή υψηλά οξειδωτικών ουσιών, συνήθως ρίζες υδροξυλίου. Στη διεργασία χρειάζονται καταλύτες, και οι πιο εφαρμοζόμενοι είναι το αντιδραστήριο Fenton και το διοξείδιο τιτανίου. (Amat A.M., Φεβρουάριος 2005)

Εικόνα 5.2. Πιλοτικό ηλιακό σύστημα για επεξεργασία λυμάτων

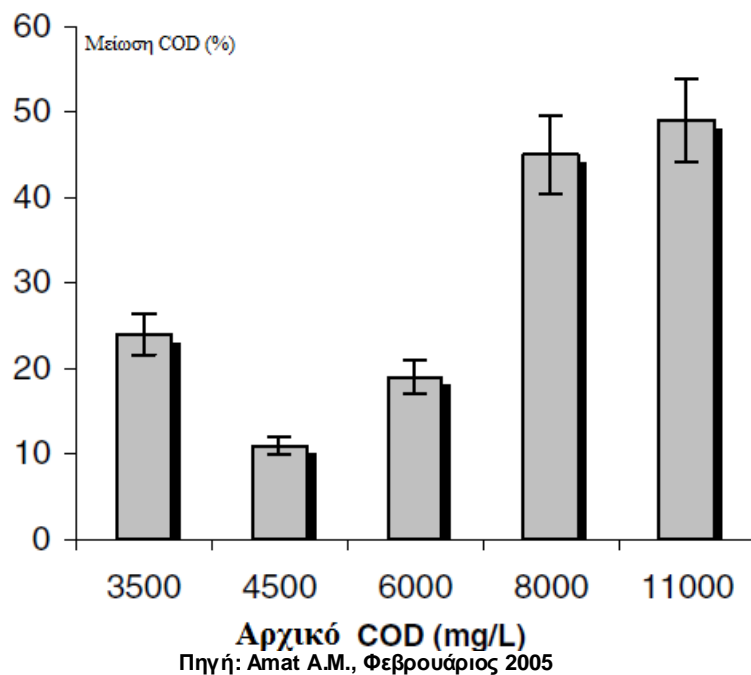


Πηγή: Amat A.M., Φεβρουάριος 2005

Με την ηλιακή φωτοκατάλυση, οι φαινόλες αποσυνθέτονται εύκολα και μειώνεται το BOD κατά 30 – 50%.

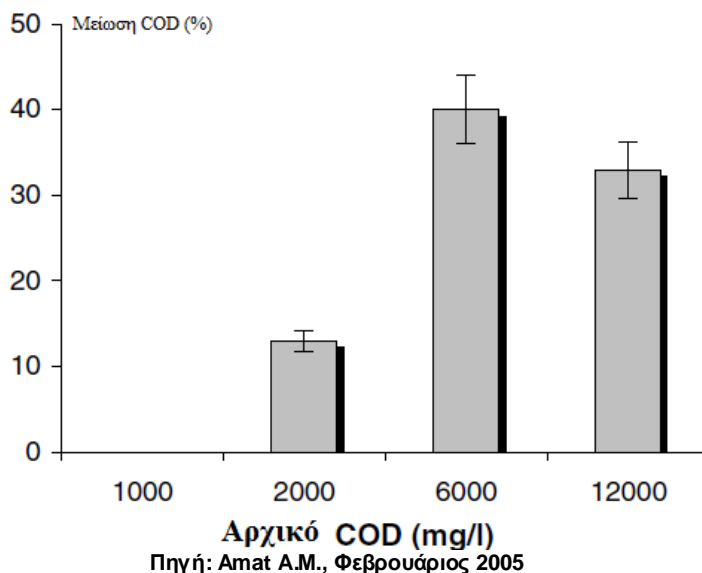
Το Σχήμα 5.61 δείχνει την μείωση του COD, καθώς το λύμα δέχεται ηλιακή ακτινοβολία 700 kJ / m² χρησιμοποιώντας ως καταλύτη το αντιδραστήριο Fenton.

Σχήμα 5.61. Μείωση COD με ηλιακή φωτοκατάλυση και αντιδραστήριο Fenton



Το διοξείδιο του τιτανίου χρησιμοποιήθηκε επίσης ως καταλύτης. Τα αποτελέσματα στο Σχήμα 5.62 δείχνουν ότι η μείωση του COD είναι της ίδιας τάξης σε σχέση με το αντιδραστήριο Fenton.

Σχήμα 5.62. Μείωση COD με ηλιακή φωτοκατάλυση και καταλύτη διοξείδιο τιτανίου.



6.5.3.4 Προσρόφηση

Αυτή η μέθοδος βασίζεται στην πρόσθεση ενός προσροφήσιμου υλικού, όπως τέφρα κάρβουνου, ενεργού άνθρακα κτλ στα λύματα για την αφαίρεση των ρύπων. Παρατηρείται υψηλή αφαίρεση χρώματος, COD και AOX.

Η πτητική τέφρα είναι ένα απόβλητο – προϊόν της βιομηχανίας πολτού και χάρτου και προέρχεται από την καύση των στερεών απόβλητων, αλλά αν χρησιμοποιηθεί ως προσροφήσιμο υλικό μπορεί να αφαιρέσει 94% του χρώματος από τα υγρά απόβλητα σε αντίθεση με την χρήση μεγάλων ποσοτήτων ασβέστου που επιτυγχάνουν το ίδιο γεγονός.

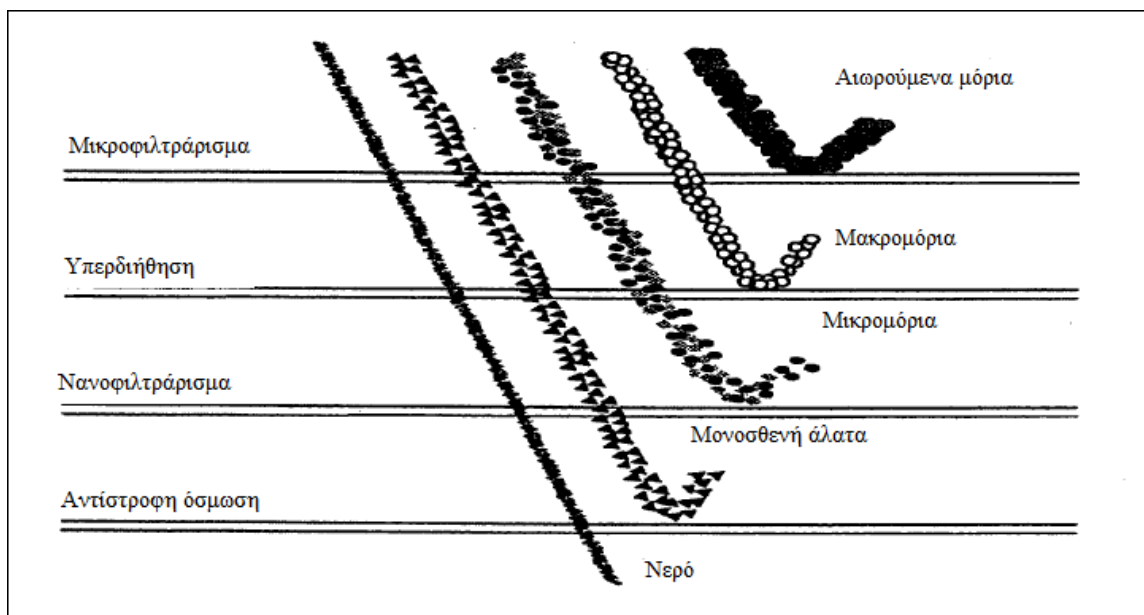
Ο Meyer (1992) έκανε δοκιμές με προσροφήσιμα υλικά χαμηλού κόστους. Τα καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν με τη χρήση κάρβουνου (67%) και φλουδών ρυζιού (65%) για την αφαίρεση χρώματος.

6.5.3.5 Διεργασίες με μεμβράνες

Οι διεργασίες με μεμβράνες χρησιμοποιούνται εκτενώς για την επεξεργασία πόσιμου νερού αλλά και για σκοπούς επαναχρησιμοποίησης των υγρών αποβλήτων. Αποτελεί μία διεργασία διαχωρισμού και λειτουργεί βάση της θεωρίας ότι διαφορετικές ενώσεις έχουν μεταβαλλόμενη ειδική αντίσταση στη μεταφορά τους μέσω της μεμβράνης. Ο διαχωρισμός συμβαίνει αφού το νερό περνά μέσω των πόρων της μεμβράνης στην άλλη πλευρά ενώ άλλες ενώσεις κατακρατούνται. Το είδος των ενώσεων που κρατούνται καθορίζεται από το μέγεθος των πόρων. Το φιλτράρισμα με μεμβράνες συνήθως χωρίζεται σε τρεις διαφορετικές λειτουργικές κλίμακες: το μικροφιλτράρισμα, την υπερδιήθηση και το νανοφιλτράρισμα.

Το μικροφιλτράρισμα συμβαίνει για μεμβράνες με μέγεθος πόρων ανάμεσα 0.02 - 2 μm και είναι ικανό για διαχωρισμό αιωρούμενων σωματισίων και βακτηρίων. Η υπερδιήθηση φέρει μέγεθος πόρων 0.002 – 0.002 μm που είναι αρκετό για την απόρριψη μεγάλων μακρομορίων και τέλος, το νανοφιλτράρισμα φέρει μεμβράνες με πόρους μικρότερους από 0.002 μm. Στο Σχήμα 5.63 οι ουσίες που μπορεί να απορρίψει κάθε μεμβράνη παρουσιάζονται.

Σχήμα 5.63. Διαφορετικές τεχνολογίες φιλτραρίσματος με μεμβράνες



Πηγή: Amat A.M., Φεβρουάριος 2005

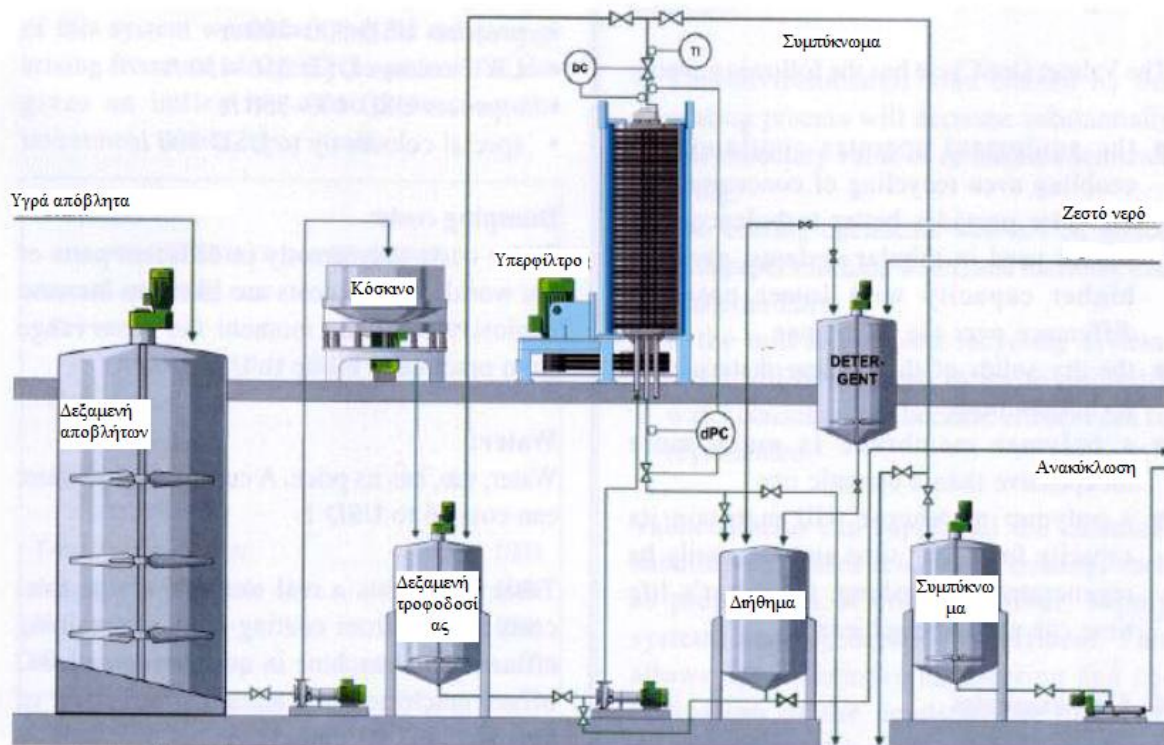
Ο Falth (2001) ερεύνησε την υπερδιήθηση αρκετών λυμάτων από μύλους πολτού και την προτείνει ως κατάλληλη συμπληρωματική διεργασία με τη βιολογική, αφού αν χρησιμοποιηθεί ως προ – επεξεργασία μειώνει το φορτίο ρύπων που θα παραλάβει ο σταθμός δευτεροβάθμιας διεργασίας.

Συνολικά, η υπεδιήθηση (Σχήμα 5.64) θεωρείται μία περιβαλλοντικά φιλική διεργασία για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Παρόλο που δεν αποσυνθέτουν οργανικές ουσίες σε διοξείδιο του

άνθρακα, είναι ικανή για την παραγωγή λυμάτων υψηλής ποιότητας που είναι πιο κατάλληλα για την επαναχρησιμοποίηση στη βιομηχανία, και επομένως μειώνει τη ζήτηση σε νερό. Επίσης, ένα πιο συγκεντρωμένο ρεύμα σχηματίζεται από το υπερφίλτρο που απαιτεί ένα μικρότερο αντιδραστήρα για περαιτέρω επεξεργασία.

Το φιλτράρισμα με μεμβράνες είναι μία πιθανή μέθοδος αφαίρεσης χρώματος, COD, AOX, αλάτων, βαρέων μετάλλων και διαλυμένων στερεών από μύλους πολτού και χάρτου. Τα εξερχόμενα λύματα από αυτή τη διεργασία μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν στην παραγωγή ή να εκκενωθούν στα ύδατα. Ο Dube (2000) έδειξε ότι 88% και 89% μείωση των COD και BOD σημειώθηκαν αντίστοιχα.

Σχήμα 5.64. Παράδειγμα ενός συστήματος ανάκτησης με υπερδιήθηση για την αφαίρεση χρώματος



Πηγή: Amat A.M., Φεβρουάριος 2005

6.5.3.6 Αφαίρεση χρώματος με χημική οξείδωση

Ένας αριθμός χημικών είναι ικανός για την οξείδωση χρωμοφορικών ενώσεων. Χρησιμοποιώντας την οξείδωση ως μέθοδο αφαίρεσης χρώματος προκαλείται η καταστροφή των τοξικών ενώσεων χωρίς το σχηματισμό ιλύος. Οξειδωτικά που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι το οξυγόνο, το όζον, το χλώριο, το διοξείδιο του χλωρίου και υπεροξυγόνα.

Υπό κανονικές συνθήκες, η οξείδωση οργανικών ενώσεων με οξυγόνο δεν είναι θερμοδυναμικά ευνοϊκή και επομένως, υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις απαιτούνται για να αναγκάσουν την αντίδραση να συμβεί. Ο Sun (1989) παρατήρησε μείωση 60 – 70% του χρώματος από τα απόβλητα λεύκανσης υπό συνθήκες 150 °C και 150 psi για 40 min. Υπό τις ίδιες συνθήκες, ο αποχρωματισμός δεν επιτυγχάνεται χωρίς την πρόσθεση οξυγόνου.

Η οξείδωση με όζον δεν απαιτεί τις αυστηρές συνθήκες που χρειάζονται με το οξυγόνο. Η επεξεργασία των αποβλήτων με όζον φαίνεται να είναι αποτελεσματική στη μείωση χρώματος, AOX και COD. Άλλα πλεονεκτήματα από τη χρήση όζοντος περιλαμβάνουν τα υψηλά επίπεδα διαλυμένου οξυγόνου στα τελικά απόβλητα και τη δράση του όζοντος ως βακτηριοκτόνο. Πλήρης αφαίρεση

χρώματος δεν επιτυγχάνεται με το όζον. Οι Amero και Hilleke (1993) βρήκαν ότι 50% του χρώματος αποσυντίθεται γρήγορα, 40% αργά (απαιτώντας μεγάλες εφαρμογές όζοντος), και 10% ήταν ανθεκτικό στην επεξεργασία με όζον. Το κύριο εμπόδιο που παρεμποδίζει την εφαρμογή της επεξεργασίας όζοντος σε μεγάλη κλίμακα είναι το υψηλό κόστος της παραγωγής όζοντος.

Μέσα λεύκανσης που περιέχουν χλώριο φαίνεται να μειώνουν το χρώμα στα απόβλητα, αλλά η ανησυχία όσον αφορά τις χλωριωμένες οργανικές ενώσεις που παράγονται από αυτήν την εφαρμογή κάνουν αυτήν την προσέγγιση όχι και τόσο ελκυστική.

Υπεροξυγόνα, κυρίως υπεροξειδίου του υδρογόνου, είναι άλλη μία ομάδα οξειδωτικών που φαίνονται να είναι αποτελεσματικά στην μείωση χρώματος. Το υπεροξειδίου του υδρογόνου είναι ένα ελκυστικό χημικό προς χρήση επειδή οι περισσότεροι μύλοι ήδη το αποθηκεύουν για τη λεύκανση πολτού. Παρόλο που το υπεροξειδίου δεν αφαιρεί το χρώμα τόσο αποτελεσματικά όσο το όζον, έχει παρατηρηθεί ότι χρησιμοποιώντας και τα δύο σε συνδυασμό μπορεί να προκαλέσει μία αφαίρεση χρώματος υψηλού επιπέδου, και να μειώσει τις απαιτήσεις σε όζον.

6.5.3.7 Χημική Επεξεργασία (Καθίζηση / Κροκίδωση)

Η χημική επεξεργασία σήμερα χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο από τη βιομηχανία πολτού και χάρτου αφού η βιολογική επεξεργασία δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα όσον αφορά τη μείωση COD. Είναι απαραίτητο να ξεχωρίσουμε δύο διαφορετικά είδη χημικών επεξεργασιών: την κροκίδωση και τη χημική καθίζηση, αφού περιλαμβάνουν διαφορετικούς μηχανισμούς.

Η κροκίδωση, βασίζεται σε πρόσθεση σιδηρικών ιόντων (Fe^{3+}), ιόντων αλουμινίου (Al^{3+}) ή / και πολυμερών μακριάς αλυσίδας στα υγρά απόβλητα. Πολύ μικρά κολλοειδή μόρια δεν μπορούν να αφαιρεθούν με καθίζηση λόγω μία φορτισμένης αρνητικά επιφάνειας στο νερό, που προκαλεί μία απωθητική δύναμη. Τα προστιθέμενα μεταλλικά ιόντα θα αντιδράσουν με το νερό για το σχηματισμό υδροξειδίων, που με τη σειρά τους προσροφούν τα κολλοειδή μόρια με πήξη και δημιουργούν μεγαλύτερα μόρια που μπορούν εύκολα να καθιζάνουν.

Η χημική καθίζηση είναι μία πολύ συνηθισμένη και γνωστή τεχνολογία, ειδικά για την αφαίρεση φωσφόρου. Περιλαμβάνει την πρόσθεση μεταλλικών αλάτων αλουμινίου, σιδήρου ή ασβεστίου για την αλλαγή της φυσικής κατάστασης διαλυμένων στερεών και να διευκολύνει την αφαίρεση τους με καθίζηση. Τα λύματα μύλων πολτού και χάρτου δεν περιέχουν μεγάλες συγκεντρώσεις φωσφόρου, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αφαίρεση εναπομείναντος φωσφόρου που μπορεί να προστέθηκε στη βιολογική επεξεργασία ως θρεπτικό στοιχείο. Τα φορτισμένα θετικά μεταλλικά ιόντα θα αντιδράσουν με τον εναπομείναντα φώσφορο και τα ρητινικά οξέα στα λύματα, και σχηματίζουν αδιάλυτα ιζήματα, που μπορούν να διαχωριστούν από την υγρή φάση με καθίζηση ή επίπλευση.

Ο Kumar (2011) ερεύνησε τη διεργασία κροκίδωσης σε δεξαμενή μαύρου διαλύματος και βρήκε ότι το χλωρίδιο του αλουμινίου ως παράγοντας κροκίδωσης μείωσε το COD κατά 84%. Επίσης, 92% του χρώματος αφαιρέθηκε.

Παρόλο ότι η χημική επεξεργασία δείχνει καλά αποτελέσματα, έχει κάποια μειονεκτήματα όπως αφυδάτωση και ανάγκη εκκένωσης παραχθείσας ιλύος.

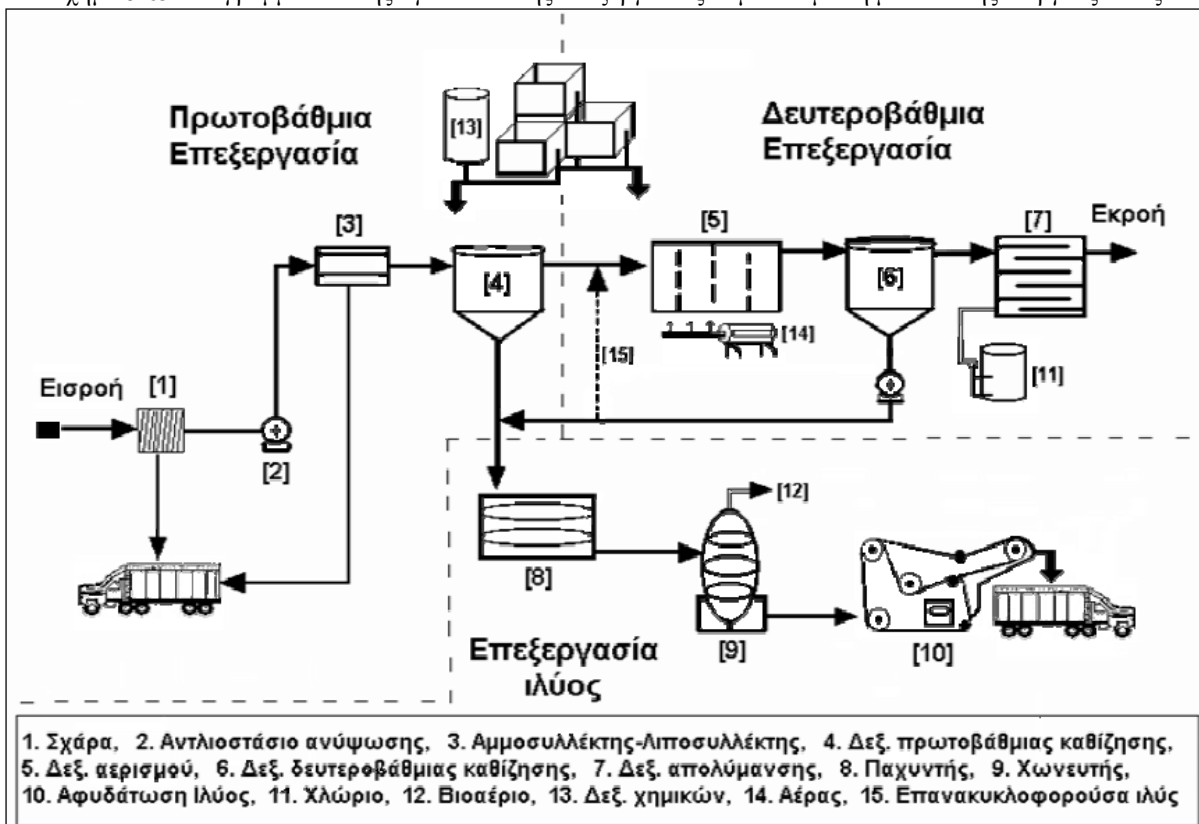
6.5.4 Ενσωματωμένα / Υβριδικά συστήματα επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Οι ενσωματωμένες διεργασίες φυσικοχημικής και βιολογικής επεξεργασίας έχουν κερδίσει αυξημένη προσοχή σε μία προσπάθεια βελτίωσης της αποτελεσματικότητας των επεξεργασιών των υγρών αποβλήτων. Αυτές οι έρευνες δείχνουν ότι οι ενσωματωμένες διεργασίες συνήθως παράγουν καλύτερη αποτελεσματικότητα μείωσης ρύπων σε σύγκριση με τις απλές. Ο Helble (1999) συνδύασε οξονισμό με αντιδραστήρα σταθερής κλίνης και πέτυχε μείωση COD περισσότερο από 80%. Οι

Kontardjieff και Jones (1997) χρησιμοποίησαν ένα σύστημα αποτελούμενο από αερόβιο βιοφίλτρο και αεριζόμενη δεξαμενή και μείωσαν κατά 82% το BOD. Ο Buzzini (2006) χρησιμοποίησε ηλεκτροχημική οξείδωση με UASB αντιδραστήρα και πέτυχε μείωση COD και χρώματος κατά 93% και 96% αντίστοιχα. Ο Lerner (2007) ερεύνησε το συνδυασμό UASB αντιδραστήρα και ενεργούς ιλύος και πέτυχε καλύτερη απόδοση σε σχέση με τη χρήση μόνο της ενεργούς ιλύος.

Η πιο κοινά εφαρμοζόμενη μέθοδος δευτεροβάθμιας επεξεργασίας για απόβλητα πολτού και χάρτου είναι η βιολογική επεξεργασία σε διεργασία ενεργούς ιλύος. Στο Σχήμα 5.65 δίνεται ένα απλό σκαρίφημα (διάγραμμα ροής) μιας εγκατάστασης βιολογικής επεξεργασίας υγρών αστικών αποβλήτων. Το σύνολο των διεργασιών αυτών αποτελεί τη διαδικασία της επεξεργασίας, κύρια επιδίωξη της οποίας είναι η απαλλαγή της μάζας των αποβλήτων από τους ρύπους και δευτερεύουσα επιδίωξη η εξουδετέρωση των ρύπων.

Σχήμα 5.65. Διάγραμμα τυπικής εγκατάστασης επεξεργασίας λυμάτων με τη μέθοδο της ενεργούς ιλύος



Πηγή: Ευθύμιος Νταρακάς, 2006

Οι πιο συνηθισμένες διαδικασίες καθαρισμού που εμφανίζονται, είναι η υποδοχή των υγρών αποβλήτων, η αφαίρεση χονδρών στερεών συνήθως με σχάρες και κόσκινα, η αφαίρεση λιπών και ελαίων (λιποσυλλέκτες) και η αφαίρεση της άμμου (αμμοσυλλέκτες). Ακολουθεί η δεξαμενή πρωτοβάθμιας καθίζησης, η δεξαμενή αερισμού και η δεξαμενή τελικής καθίζησης. Τα λύματα που υπερχειλίζουν από την δεξαμενή τελικής καθίζησης απολυμαίνονται (συνήθως με χλωρίωση ή υπεριώδη ακτινοβολία ή όζον) και διατίθενται σε κάποιον αποδέκτη. Η ιλύς που συγκεντρώνεται στον πυθμένα της δεξαμενής τελικής καθίζησης οδηγείται στον παχυντή προς συμπύκνωση, μετά στη δεξαμενή χώνευσης προς βιοσταθεροποίηση και τέλος αφού αφυδατωθεί είτε με φυσική ξήρανση (κλίνες ξήρανσης) είτε με μηχανική αφυδάτωση (φυγοκέντρωση ή ταινιοφιλτροπρέσες) διατίθεται σε χώρους που προβλέπει η αρμόδια αρχή.

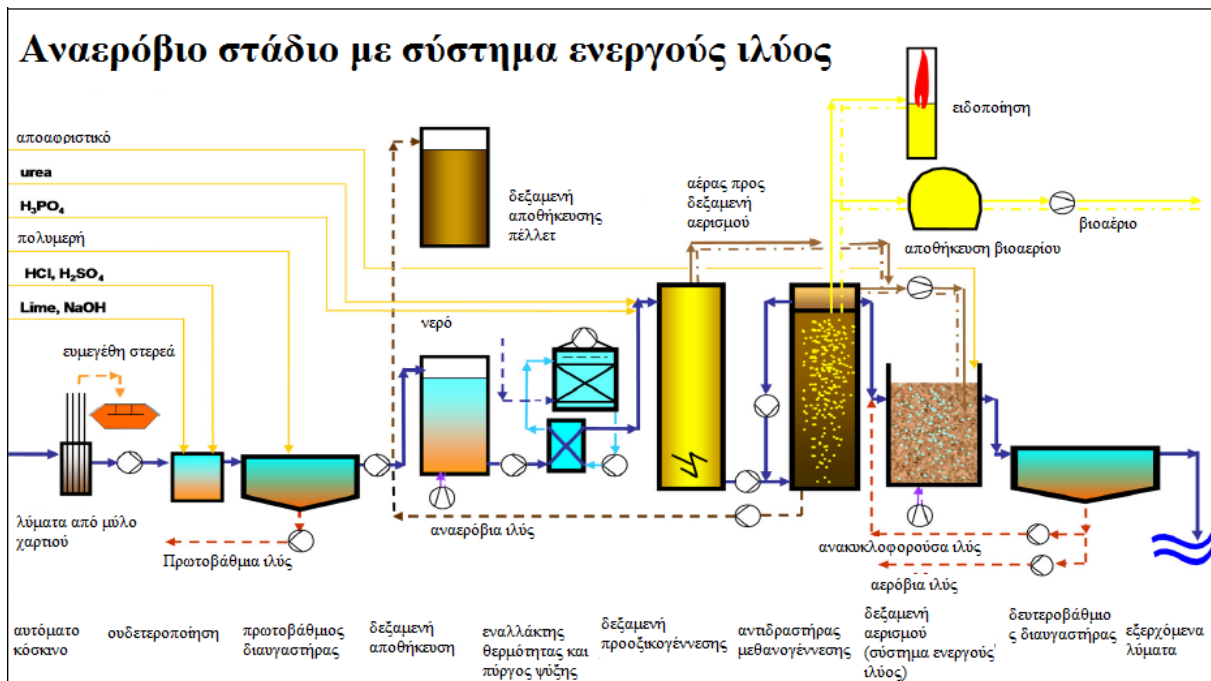
Άλλα τρία παραδείγματα για πλήρεις σταθμούς επεξεργασίας λυμάτων δίνονται για να παρουσιαστούν τα πρακτικά σημεία του συνδυασμού αντιδραστήρων: το αναερόβιο – αερόβιο σύστημα (Σχήμα 5.66), το αερόβιο – αερόβιο (Σχήμα 5.67) και το βιοφίλτρο δύο σταδίων, το οποίο μερικές

φορές συνδυάζεται με κάποιο από τους προαναφερόμενους συνδυασμούς διεργασιών σαν τελικό στάδιο.

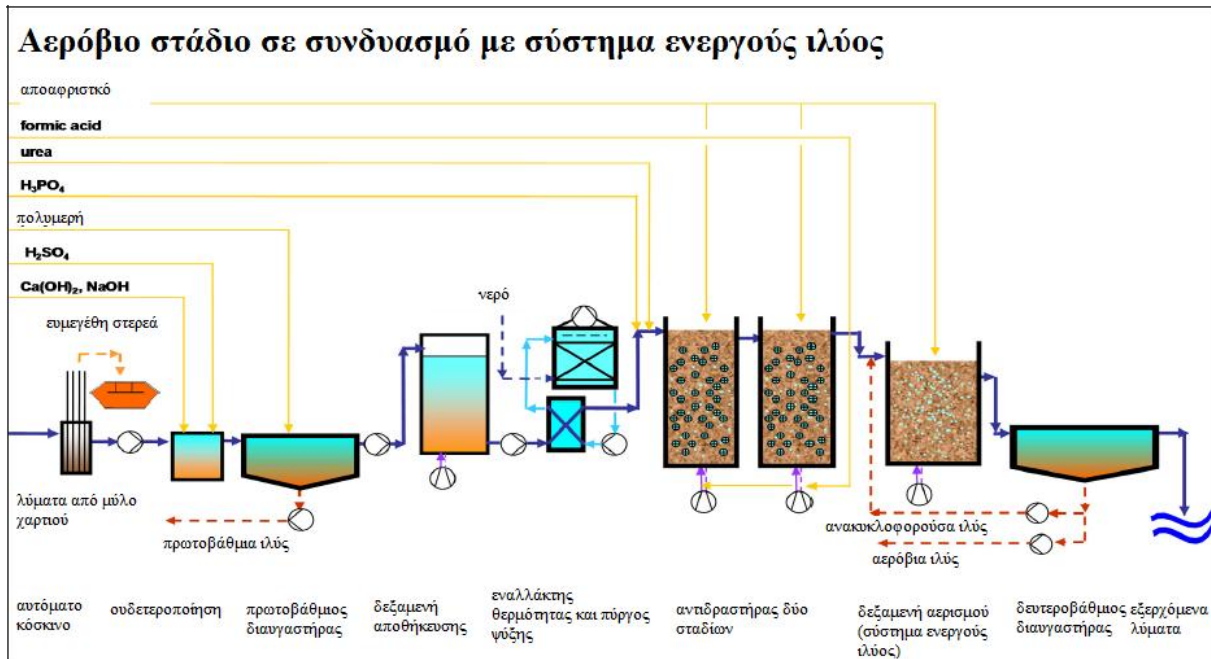
Σε όλα τα παραδείγματα τα στάδια προεπεξεργασίας πριν τους βιοαντιδραστήρες είναι τα ίδια: ένα σύστημα κοσκίνων για την εξάλειψη ευμεγεθών στερεών, μία δεξαμενή εξισορρόπησης – ουδετεροποίησης (εξαρτάται από το εύρος pH στα λύματα, δεν είναι πάντα απαραίτητη), ένα πρωτοβάθμιο σύστημα (επίπλευση ή φίλτρο), μία δεξαμενή αποθήκευσης (πάντα μερικώς γεμισμένη, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται εξισορρόπηση συγκέντρωσης), και ένα στάδιο ψύξης (εξαρτάται από τη θερμοκρασία λυμάτων και τη θερμοκρασία εκκένωσης που απαιτείται και δεν είναι πάντα απαραίτητο).

Οι Chen και Horan (1998) έχουν αναφέρει τη χρήση μίας αναερόβιας αερόβιας προσέγγισης δύο σταδίων για την μείωση COD και θειούχων ενώσεων. Τα ποσοστά μείωσης για το COD και τις συγκεκριμένες ενώσεις ήταν 66% και 73% αντίστοιχα. Γενικά, η αερόβια αποσύνθεση εκτελέστηκε σε μεσοφιλικές θερμοκρασίες 35 – 37 °C. Όμως, η χρήση θερμοφιλικών θερμοκρασιών προτείνεται αφού δίνει γρηγορότερους ρυθμούς αντίδρασης και υψηλότερο ρυθμό παραγωγής αερίου. Ο Welandar (1999) πέτυχε υψηλή αφαίρεση COD χρησιμοποιώντας αναερόβια επεξεργασία ακολουθούμενη από αερόβια στους 55 °C. (Mobius Christian H., 2006)

Σχήμα 5.66. Αναερόβιος αντιδραστήρας σε συνδυασμό με σύστημα ενεργούς ιλύος

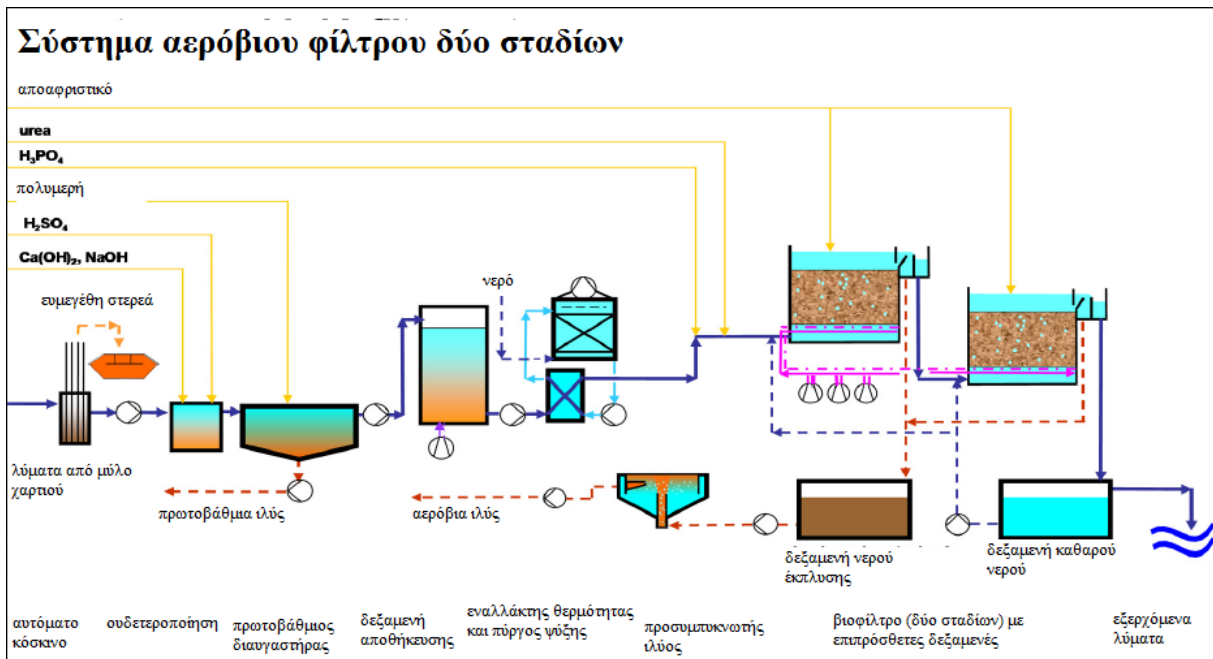


Σχήμα 5.67. Αερόβιος αντιδραστήρας δύο σταδίων συνδυασμένος με σύστημα ενεργούς ιλύος



Πηγή: Mobius Christian H., 2006

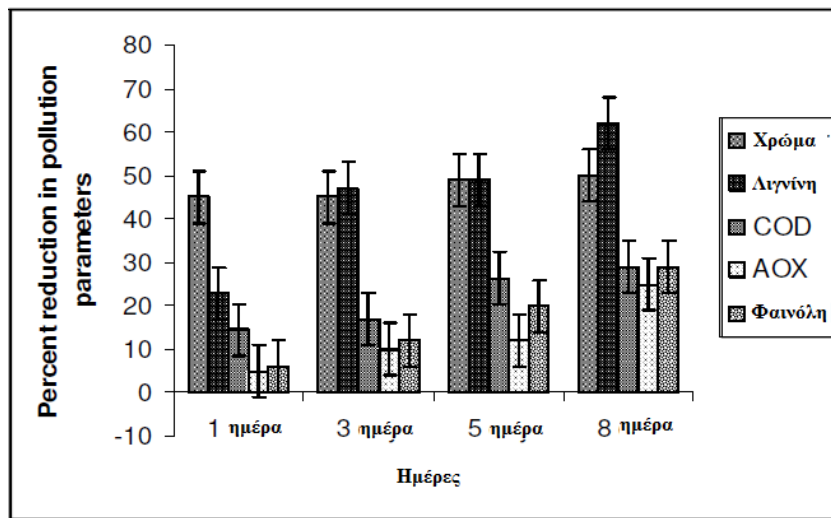
Σχήμα 5.68. Σύστημα αερόβιου βιοφίλτρου δύο σταδίων συνδυασμένο με σύστημα ενεργούς ιλύος.



Πηγή: Mobius Christian H., 2006

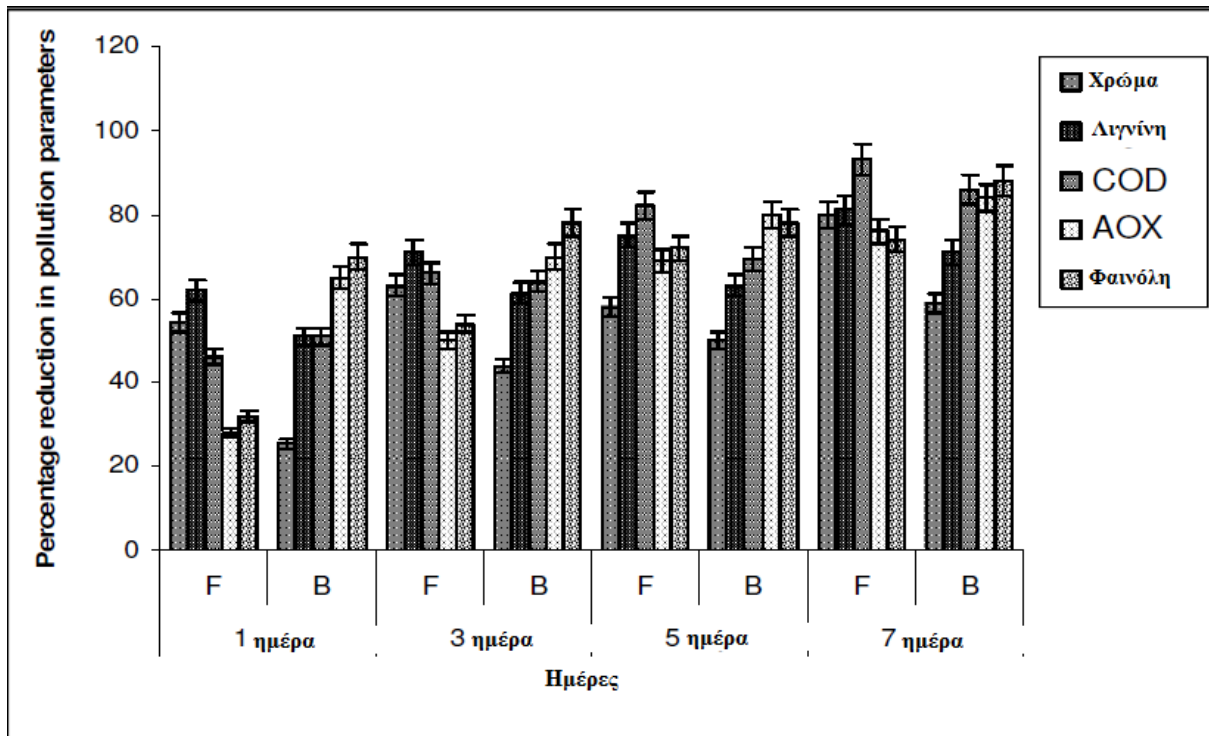
Μία έρευνα στόχευε στην αφαίρεση χρώματος και άλλων παραγόντων ρύπανσης από τα λύματα πολτού και χάρτου με αναερόβια επεξεργασία που έπειτα ακολουθείται από επεξεργασία με μύκητες (*Paecilomyces* sp.) και βακτήρια (*Microbrevlis luteum*). Μετά την αναερόβια επεξεργασία, παρατηρήθηκε σημαντική μείωση στο χρώμα κατά 50%, λιγνίνη 62%, COD 29%, AOX 25% και φαινόλες 29% (Σχήμα 5.69). Η αερόβια επεξεργασία με τους μύκητες έδειξε μείωση στο χρώμα 80%, λιγνίνη 81%, COD 93%, AOX 76% και φαινόλες 74%, ενώ με τα βακτήρια σημειώθηκαν μειώσεις 60%, 70%, 80%, 84% και 88% αντίστοιχα (Σχήμα 5.70). (Singh Pratibha, Ιανουάριος 2007)

Σχήμα 5.69. Αλλαγές στο χρώμα, λγνίνη, COD, AOX και φαινόλες μετά την αναερόβια επεξεργασία.



Πηγή: Singh Pratibha, Ιανουάριος 2007

Σχήμα 5.70. Αλλαγές στο χρώμα, λγνίνη, COD, AOX και φαινόλες μετά την αερόβια επεξεργασία.



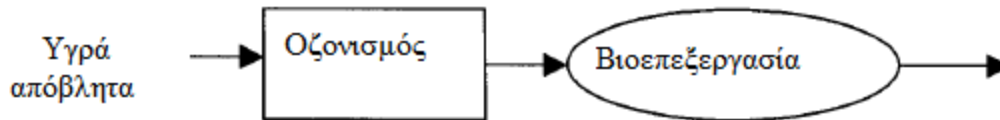
Πηγή: Singh Pratibha, Ιανουάριος 2007

Σε κάποια έρευνα, ο οζονισμός συνδυάζεται με το βιοφιλτράρισμα (Mobius και Cordes – Tolle, 1997). Η μείωση των AOX στον αντιδραστήρα όζοντος είναι κατά μέσο όρο 67%. Στο ακόλουθο βιοφίλτρο, τα επίπεδα AOX μειώνονται, κατά 15% μέσο όρο. Ο οζονισμός όμως βελτιώνοντας τη βιολογική διάσπαση επίμονων ενώσεων, αυξάνει το BOD και για αυτό το λόγο τα λύματα πρέπει να επεξεργαστούν με περεταίρω βιολογική μέθοδο. Η διεργασία αποδείχθηκε ικανοποιητική ως στρατηγική μετά – επεξεργασίας βιολογικά επεξεργασμένων λυμάτων όπου τα επίπεδα COD, AOX και χρώματος ακόμα υπερβαίνουν τα όρια.

6.5.4.1 Οξονισμός συνδυασμένος με βιολογική επεξεργασία

Η αφαίρεση χρώματος και οργανικών ενώσεων από τα υγρά απόβλητα χρησιμοποιώντας οξονισμό ακολουθούμενο από βιολογική επεξεργασία έχει ερευνηθεί. Το Σχήμα 5.71 δείχνει το σχηματικό διάγραμμα της ενσωματωμένης επεξεργασίας.

Σχήμα 5.71. Σχηματικό διάγραμμα επεξεργασίας οξονισμού συνδυασμένου με βιολογική επεξεργασία

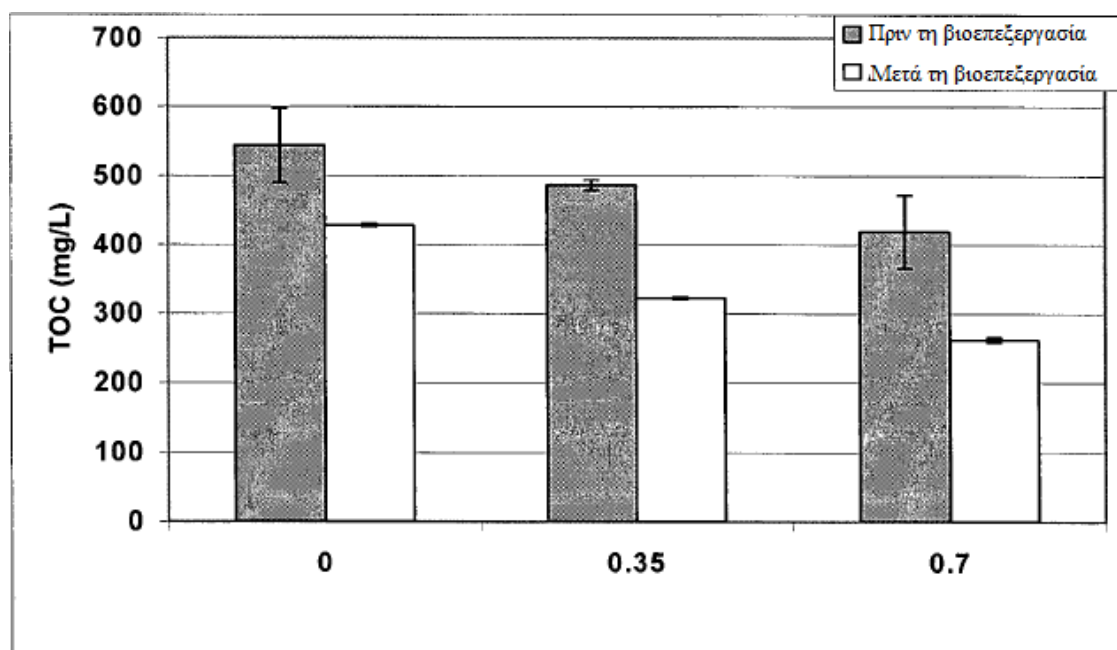


Ο Nakamura (1997) επεξεργάστηκε τα λύματα μύλου πολτού χρησιμοποιώντας συνδυασμό όζοντος και ενεργούς ιλύος με θετικά αποτελέσματα. Οι Mobius και Cordes – Tolle (1997) συνδύασαν τον οξονισμό με το βιοφιλτράρισμα για την επεξεργασία υγρών αποβλήτων επεξεργασίας πολτού και χάρτου. Σημειώθηκε σχεδόν 67% μείωση AOX στον αντιδραστήρα όζοντος, και το ακολουθούμενο βιοφίλτρο μείωσε τις AOX ενώσεις κατά 15% επιπλέον. Επίσης, παρατηρήθηκε αφαίρεση χρώματος περισσότερο από 90% με οξονισμό και επιπρόσθετη μείωση συμβαίνει στη βιολογική επεξεργασία. Ο Rittman (2002) επεξεργάστηκε χρωματισμένα λύματα με οξονισμό – βιοφιλτράρισμα και παρουσίασαν ότι η συνδυασμένη αυτή διεργασία μπορεί να αφαιρέσει το περισσότερο χρώμα (~90%) και κάποια ποσότητα διαλυμένου οργανικού άνθρακα (~38%). Επιπροσθέτως της υψηλής μείωσης COD από τα υγρά απόβλητα, η διεργασία αυτή παράγει μικρότερη ποσότητα ιλύος στη βιολογική επεξεργασία.

Αρκετές έρευνες παρατηρούν ότι ο ρυθμός βιοαποδομησιμότητας των οργανικών ενώσεων (που μετριέται ως BOD / COD) αυξάνεται κατά την επεξεργασία της προηγμένης οξείδωσης.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.72, όταν ο οξονισμός συνδυάζεται με βιολογική επεξεργασία, μία συνολική αφαίρεση οργανικών ενώσεων σχεδόν 50% παρατηρείται. Αυτό το ποσοστό είναι μεγαλύτερο από το άθροισμα των μειώσεων που παρατηρείται για καθεμία διεργασία ξεχωριστά.

Σχήμα 5.72. Μείωση οργανικών ενώσεων με την επεξεργασία οξονισμού συνδυασμένου με βιολογική επεξεργασία

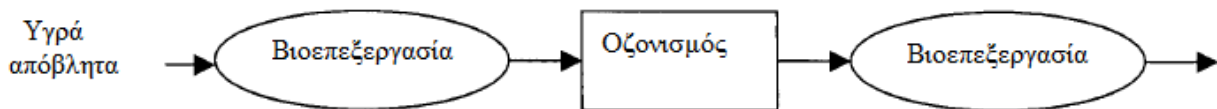


Πηγή: Singh Pratibha, Ιανουάριος 2007

6.5.4.2 Βιολογική προ – επεξεργασία συνδυασμένη με οζονισμό και με μία δεύτερη βιολογική επεξεργασία

Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στην υπόθεση ότι η αφαίρεση των βιοαποδομήσιμων οργανικών ενώσεων σε ένα στάδιο προ – επεξεργασίας μπορεί να βελτιώσει τη συνολική απόδοση της μεθόδου συνδυασμένης επεξεργασίας. Το Σχήμα 5.73 δείχνει το σχηματικό διάγραμμα της μεθόδου.

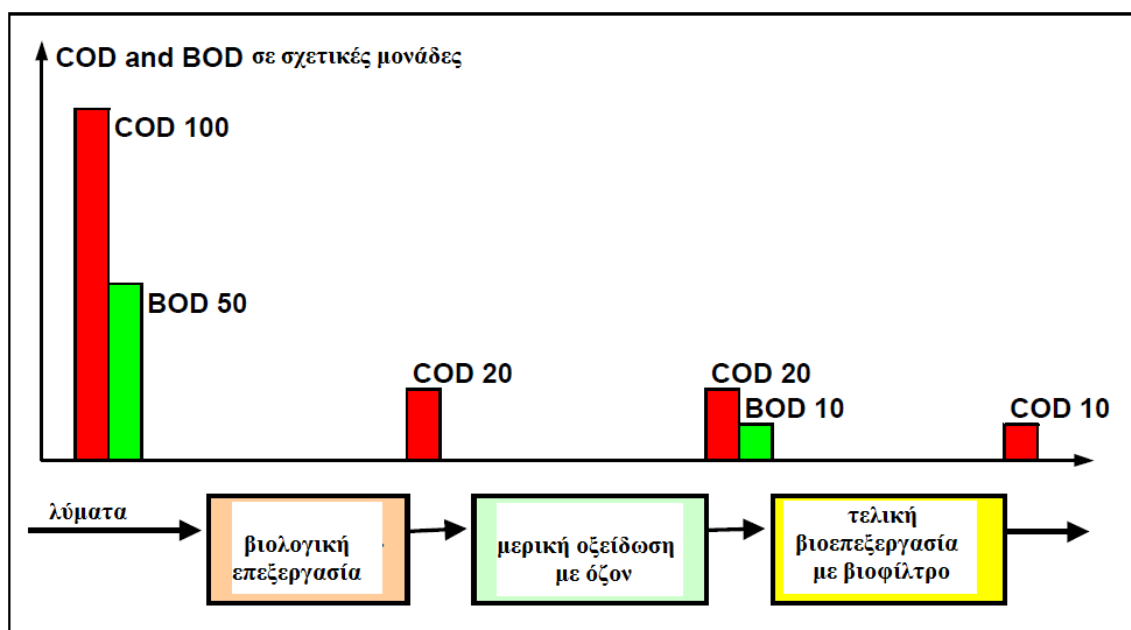
Σχήμα 5.73. Σχηματικό διάγραμμα επεξεργασίας οζονισμού συνδυασμένου με δύο στάδια βιολογικής επεξεργασίας



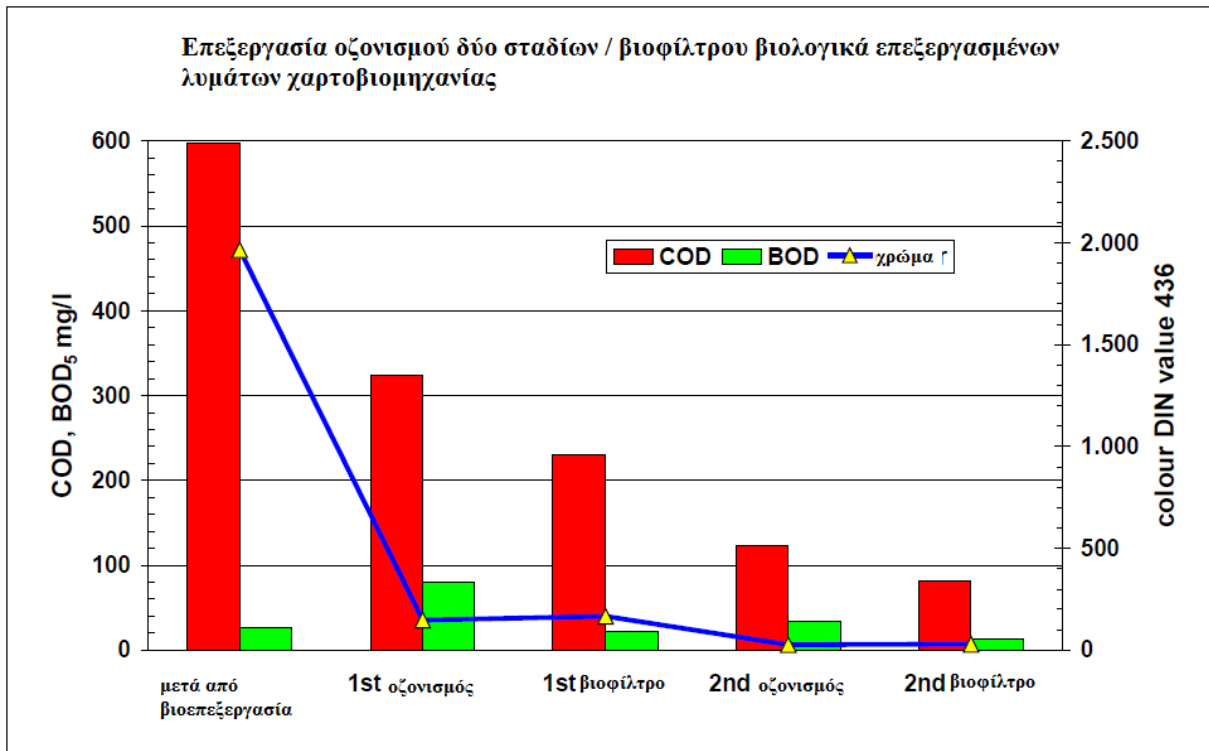
Ο Heinze (1995), που μελέτησε την αφαίρεση οργανικών ενώσεων από τα λύματα χαρτοβιομηχανίας, αναφέρει ότι περισσότερες τέτοιες ενώσεις απομακρύνθηκαν με το συνδυασμένη επεξεργασία πολλαπλών σταδίων.

Επίσης, αν μετά από βιολογική επεξεργασία, τα λύματα περάσουν από οξείδωση με όζον και έπειτα από βιοφίλτρο, έχουμε τα αποτελέσματα στο Σχήμα 5.74, όπως και στο Σχήμα 5.75 με οζονισμό δύο σταδίων. Η μείωση χρώματος είναι 98% και των ΑΟΧ περισσότερο από 80%. Το COD μειώνεται κατά 86%. (Mobius Christian H., 2006)

Σχήμα 5.74. Σχηματική παρουσίαση διεργασίας χημικής – βιοχημικής οξείδωσης λυμάτων μύλου χαρτιού



Σχήμα 5.75. Αποτελέσματα σταθμού επεξεργασίας λυμάτων δύο σταδίων μετά από διεργασία ενεργούς ιλύος

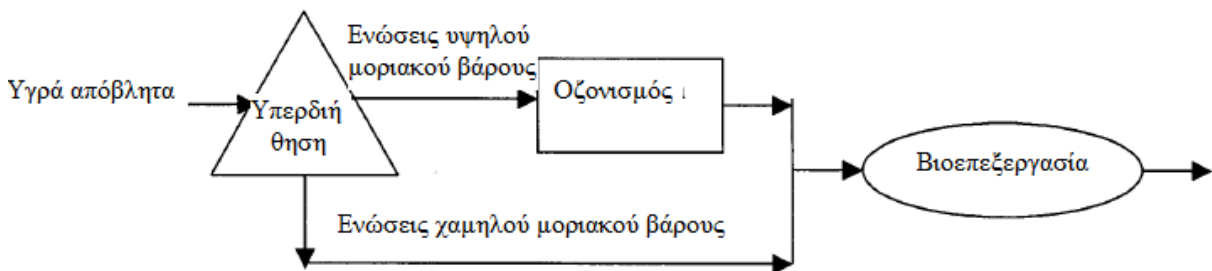


Πηγή: Mobius Christian H., 2006

6.5.4.3 Υπερδιήθηση συνδυασμένη με οζονισμό και βιολογική επεξεργασία

Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στην ιδέα ότι η αφαίρεση των οργανικών ενώσεων χαμηλού μοριακού βάρους και η συγκέντρωση των λυμάτων χρησιμοποιώντας ένα στάδιο υπερδιήθησης μπορούν να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση της μεθόδου συνδυασμένων επεξεργασιών. Το Σχήμα 5.76 δείχνει το σχηματικό διάγραμμα αυτής της επεξεργασίας.

Σχήμα 5.76. Σχηματικό διάγραμμα επεξεργασίας υπερδιήθησης συνδυασμένης με οζονισμό και βιολογική επεξεργασία



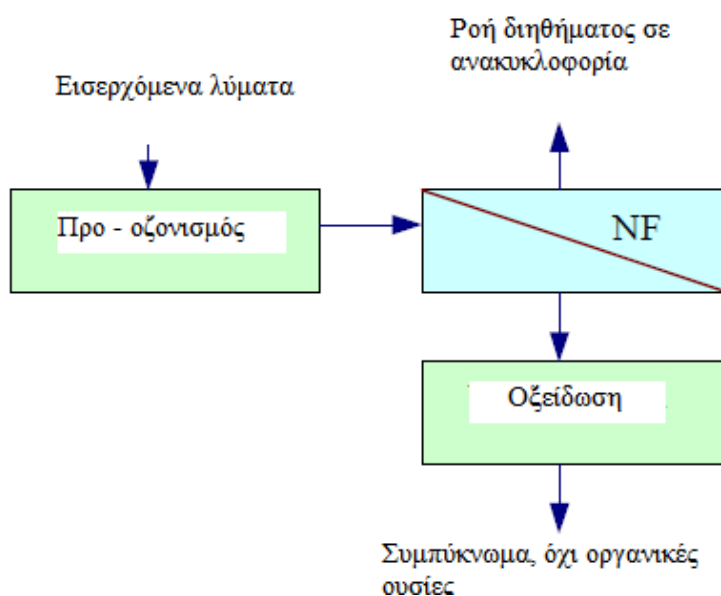
6.5.4.4 Νανοφιλτράρισμα και οξείδωση

Το νανοφιλτράρισμα και η οξείδωση είναι γνωστά για την ικανότητά τους να εξαλείφουν το χρώμα και την δυσάρεστη οσμή από τα λύματα. Σε πολλές περιπτώσεις, η αποτελεσματικότητά τους είναι αρκετά παρόμοια και στην πραγματικότητα, είναι πολύ συνηθισμένο να υπάρχουν μονάδες όπου οι διεργασίες αυτές συνδυάζονται για την επεξεργασία χρώματος ή οσμής των υγρών αποβλήτων. Ένα αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό αυτού του συνδυασμού είναι ότι και οι δύο μέθοδοι μπορούν να λειτουργήσουν ως προ ή μετά – επεξεργασία της άλλης. Με αυτόν τον τρόπο, κάποια στερεά που

ιζηματοποιούνται με την οξείδωση μπορούν αργότερα εύκολα να διαχωριστούν με το NF (nanofiltration - NF). Σε αυτήν την περίπτωση, η οξείδωση πρέπει να είναι το πρώτο στάδιο. Από την άλλη, όταν το NF δρα ως μετά – επεξεργασία, η αποστολή του περιλαμβάνει την εξάλειψη ουσιών που επιβραδύνουν την οξείδωση.

Μία εφαρμογή αυτής της υβριδίας τεχνολογίας είναι ένα σύστημα όπου η οξείδωση χρησιμοποιείται ως προ και μετά επεξεργασία για το NF, και έτσι το σύστημα αποτελείται από τρεις μονάδες: προ – οζονισμός, NF και οξείδωση (Σχήμα 5.77). Το διαυγασμένο διάλυμα ενός μύλου χάρτου επεξεργάζεται με οζονισμό με το σκοπό εξάλειψης ή μείωσης της περιεκτικότητας σε λιγνίνη. Στο δεύτερο στάδιο, το ρεύμα ναοφιλτράρεται και δύο νέα διαλύματα δημιουργούνται. Το διήθημα παρουσιάζει ένα χαμηλότερο οργανικό φορτίο από το αρχικό και ανακυκλώνεται στη διεργασία. Το NF συμπύκνωμα στέλνεται στη μονάδα οξείδωσης όπου οι οργανικές ενώσεις εξαλείφονται.

Σχήμα 5.77. Διεργασία προ – οζονισμού, ναοφιλτραρίσματος και οξείδωσης

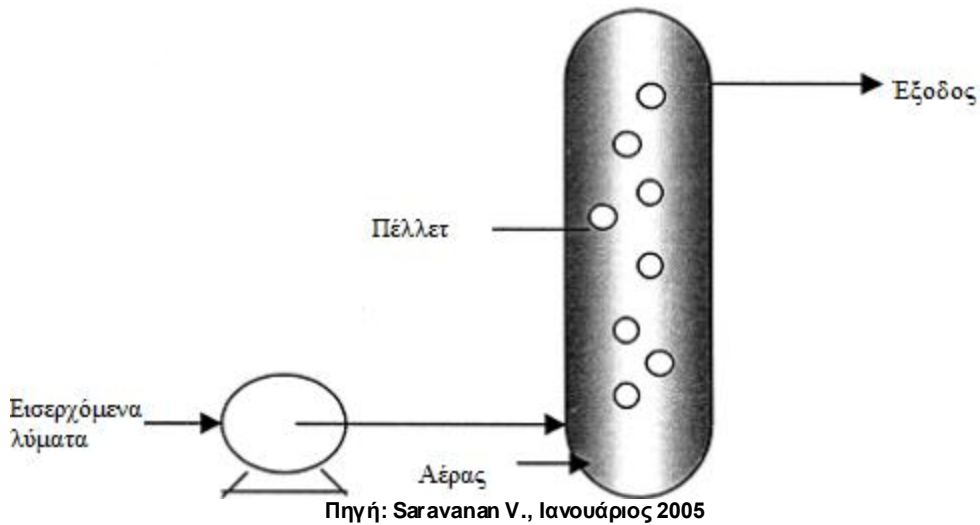


6.5.4.5 Βιο – φυσικο – χημική επεξεργασία για την αφαίρεση χρώματος

Αρκετές φυσικές και χημικές διεργασίες για την αφαίρεση χρώματος είναι ακριβές και δεν θεωρούνται οικονομικά ευνοϊκές όταν χρησιμοποιούνται μόνο για αυτόν τον σκοπό. Οι βιολογικές μέθοδοι βρέθηκαν να είναι πιο αποτελεσματικές και φιλικές στο περιβάλλον αφού είναι ικανές να αποσυνθέσουν όχι μόνο τη λιγνίνη αλλά και χλωροοργανικές ενώσεις που αποδίδονται στις ενώσεις AOX. Στη συγκεκριμένη μέθοδο, οι μύκητες *Trichoderma sp* χρησιμοποιούνται στην επεξεργασία αποβλήτων για αφαίρεση χρώματος.

Οι μύκητες σε μορφή πέλλετ εισέρχονται σε αντιδραστήρα μαζί με λύματα χρησιμοποιώντας συμπιεσμένο αέρα. Ο αντιδραστήρας λειτουργεί ακολουθιακά (Σχήμα 5.78), και αφού αποκτά σταθερή κατάσταση, μεταβαίνει σε συνεχή λειτουργία. Η έξοδος συλλέγεται από την υπερχειλίση του αντιδραστήρα. (Saravanan V., Ιανουάριος 2005)

Σχήμα 5.78. Αντιδραστήρας ρευστοποιημένης κλίνης



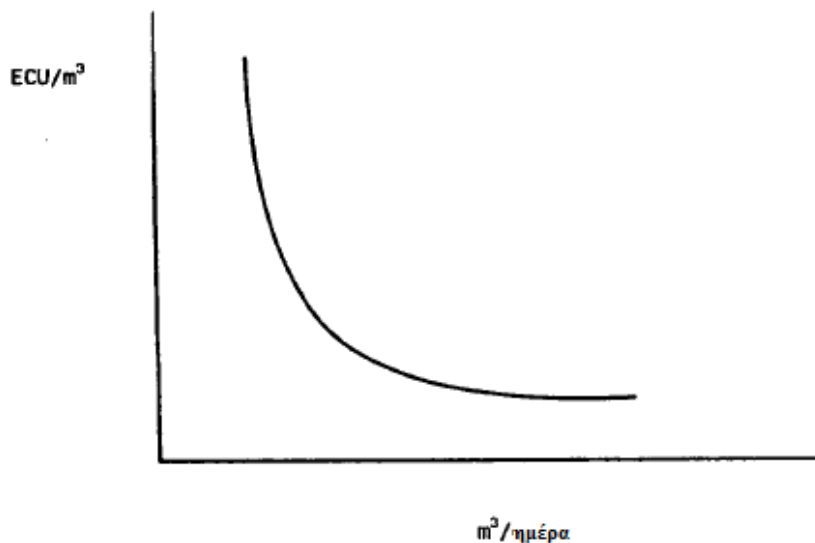
Τα εξερχόμενα απόβλητα επεξεργάζονται για να επιτευχθεί η μέγιστη μείωση χρώματος, χρησιμοποιώντας συνδυασμό φυσικο – χημικών και βιολογικών μεθόδων επεξεργασίας.

Η μέγιστη μείωση χρώματος (90 – 95%) ήταν πολύ σημαντική, χρησιμοποιώντας φυσικο – χημικές επεξεργασίες αλλά το πρόβλημα είναι η δημιουργία ιλύος και το κόστος επεξεργασίας της. Έχοντας ένα βιολογικό στάδιο επιπρόσθετα με το παραπάνω σύστημα, η παραγωγή ιλύος, το κόστος και η τοξικότητα των λυμάτων μπορούν να μειωθούν. Μόνο με τη βιολογική επεξεργασία, η μείωση χρώματος δεν μπορεί να επιτευχθεί. Έτσι, ο συνδυασμός των βιολογικών και φυσικο – χημικών μεθόδων επεξεργασίας βρέθηκε να είναι ιδανικός για την αφαίρεση χρώματος. Αυτή η μέθοδος θεωρείται φιλική περιβαλλοντικά, φθηνή και απλή.

6.6 Κόστος και απόδοση συστημάτων επεξεργασίας υγρών αποβλήτων

Μία έρευνα πάνω σε 23 σταθμούς πολτοποίησης και κατασκευής χαρτιού δείχνει το κόστος, που συνδέεται με τα εξωτερικά συστήματα επεξεργασίας νερού. Εξαρτώμενο από το οργανικό φορτίο και τη ροή, το κόστος κυμαίνεται από 0.15 – 1.50 ECU / m³ (Σχήμα 5.79). (European Commission, Μάιος 1992)

Σχήμα 5.79. Σχέση ανάμεσα σε κόστος και ροή υγρών αποβλήτων



Τα κόστη επεξεργασίας για τρία διαφορετικά συστήματα έχουν υπολογιστεί (Haskoning, 1989), με Α) πρωτοβάθμια / δευτεροβάθμια επεξεργασία (επεξεργασία ενεργούς ιλύος) με απομάκρυνση ιλύος, Β) πρωτοβάθμια / δευτεροβάθμια επεξεργασία (UASB) με απομάκρυνση ιλύος και C) επεξεργασία ενεργού άνθρακα.

Τα χαρακτηριστικά των λυμάτων δίνονται στον Πίνακα 5.71 και τα κόστη ανά m^3 ροής αποβλήτων εμφανίζονται στον Πίνακα 5.72.

Πίνακας 5.71. Χαρακτηριστικά υγρών αποβλήτων

	ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΥΓΡΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ		
	1	2	3
Ροή (m^3/h)	100	200	700
Μέγιστη ροή (m^3/h)	150	250	800
TSS (mg/l)	500	200	1.000
BOD (mg/l)	1.000	150	500

Πηγή: European Commission, Μάιος 1992

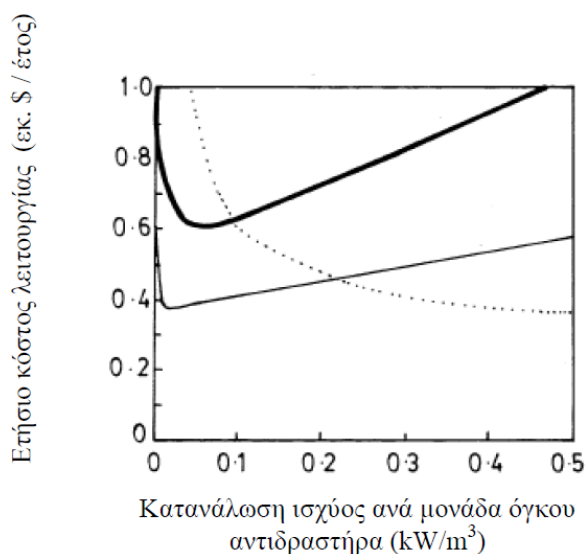
Πίνακας 5.72. Κόστη συστημάτων επεξεργασίας σε ECU/ m^3 υγρών αποβλήτων

	ΕΚΦΡΑΣΜΕΝΑ ΣΕ ECU / M^3 ΛΥΜΑΤΩΝ		
	1	2	3
A	1.36	0.47	0.47
B	0.95	0.51	0.51
C	0.69	0.66	0.62

Πηγή: European Commission, Μάιος 1992

Επίσης στο Σχήμα 5.80 που ακολουθεί γίνεται μια οικονομική σύγκριση τριών αντίστοιχα μεθόδων επεξεργασίας. Από τη σύγκριση αυτή φαίνεται καθαρά πως τα εναλλακτικά συστήματα επεξεργασίας έχουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι της ενεργούς ιλύος που είναι η συμβατική μέθοδος επεξεργασίας, και ειδικά βάση οικονομικών κριτηρίων, μπορεί να είναι αρκετά πιο κατάλληλα.

Σχήμα 5.80. Σύγκριση οικονομικού κόστους λειτουργίας της ενεργούς ύλης (—), των περιστρεφόμενων βιολογικών δίσκων (---) και διασταλλαγματικών φίλτρων (· · ·)



Πηγή: European Commission, Μάιος 1992

Για καλύτερη κατανόηση σχετικά με τις επεξεργασίες που αναφέρθηκαν, οι αποτελεσματικότητες αφαίρεσης ρύπων ανακεφαλαιώνονται στον Πίνακα 5.73.

Πίνακας 5.73. Παράδειγμα αποτελεσματικότητας μείωσης για διάφορες επεξεργασίες υγρών αποβλήτων

Επεξεργασία	Διεργασία	SS [%]	BOD [%]	COD [%]	AOX* [%]
Πρωτοβάθμια	Καθίζηση	80-90	N/A	N/A	N/A
Δευτεροβάθμια	Αεριζόμενη δεξαμενή	N/A	<95	60-70	50-65
	Βιοφίλτρο	N/A	85-95	65-75	N/A
	Αναερόβια διεργασία	N/A	60-90	40-80	N/A
Τριτοβάθμια	Κροκκίδωση (Al^{3+})	N/A	N/A	<96	N/A

Πηγή: European Commission, Μάιος 1992

Η σύγκριση ανάμεσα στο διασταλλαγματικό φίλτρο (TF), το φίλτρο άμμου αργής διήθησης (slow sand filter - SSF), το αερόβιο φίλτρο καθοδικής ροής αέρα (down-flow aerobic filter - DABF), και το UABF

φίλτρο φαίνεται στον Πίνακα 5.74. Το UABF φίλτρο είναι αποτελεσματικό για την επεξεργασία λυμάτων χαμηλής αντοχής και έχει αρκετά πλεονεκτήματα. Τα κύρια είναι:

- Έχει απλή σχεδίαση.
- Δεν απαιτεί δεξαμενή καθίζησης.
- Έχει τη δυνατότητα να διατηρεί ενεργά βιολογικά στερεά.
- Παράγει μικρές ποσότητες ιλύος.

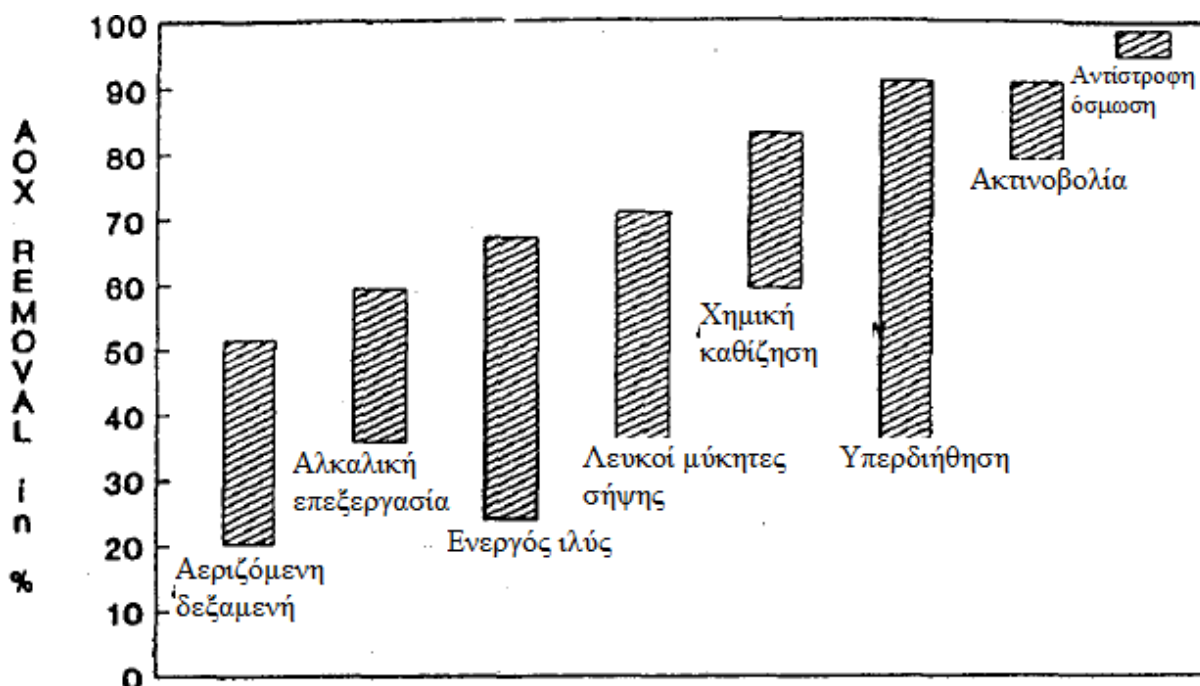
Πίνακας 5.74. Απόδοση διαφορετικών αντιδραστήρων

Τύπος	Ρυθμός φορτίου kg COD/m ³ .d	Αντοχή λυμάτων COD,mg/L	%COD μείωση
TF	2-3	95-100	>70
SSF	3-4	100-110	76
DABF	0.56-5.73	100-120	87-96
UABF	0.40-4.57	97-103	82-95

Πηγή: European Commission, Μάιος 1992

Το Σχήμα 5.81 παρουσιάζει το εύρος αποτελεσματικότητας μείωσης των AOX, για διάφορα συστήματα επεξεργασίας. Η μεγαλύτερη αφαίρεση σημειώνεται για τη χημική καθίζηση, την υπερδιήθηση, την υπεριώδη ακτινοβολία και την αντίστροφη όσμωση. (Wilson D.G, 1992)

Σχήμα 5.81. Εύρος αφαίρεσης AOX για διάφορα συστήματα επεξεργασίας



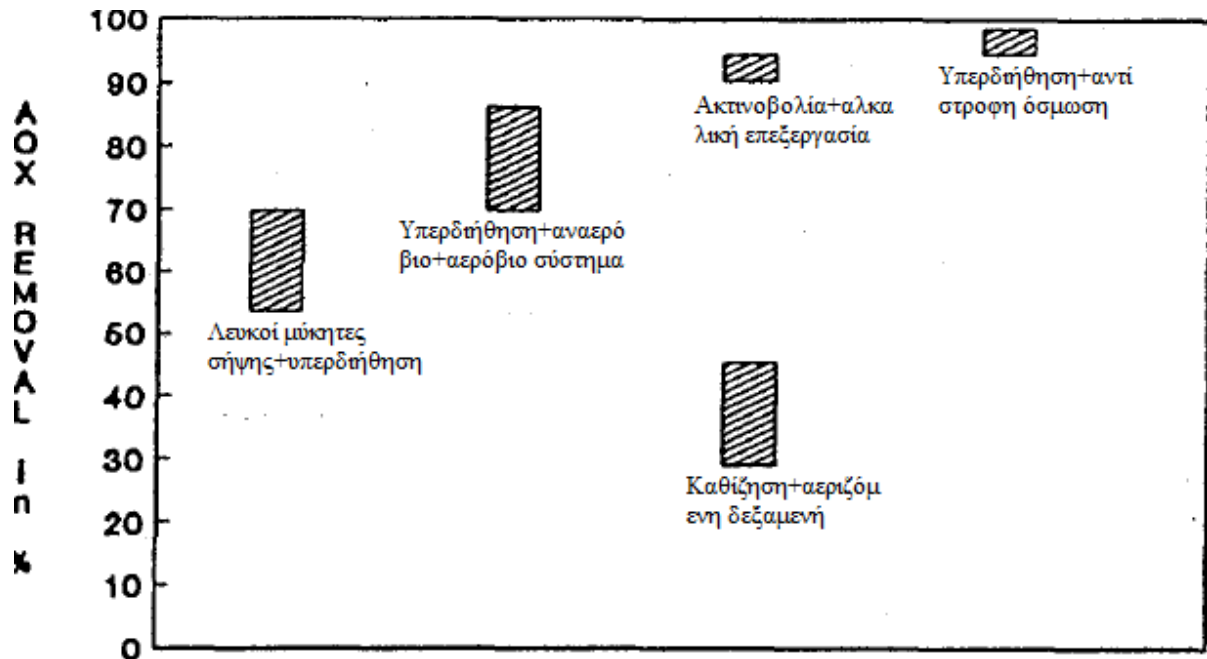
Σύστημα επεξεργασίας

Πηγή: Wilson D.G, 1992

Το Σχήμα 5.82 παρουσιάζει εύρη επεξεργασίας για συνδυασμούς διαφόρων συστημάτων που μπορούν να εφαρμοστούν στο συνολικό όγκο των αποβλήτων μέσω προ - επεξεργασίας και δευτεροβάθμιας επεξεργασίας. Η υψηλότερη αποτελεσματικότητα αφαίρεσης πέτυχε ο συνδυασμός

υπερδότησης και αναερόβιου / αερόβιου συστήματος, η υπερϊώδης και αλκαλική επεξεργασία και η υπερδότηση και αντίστροφη όσμωση.

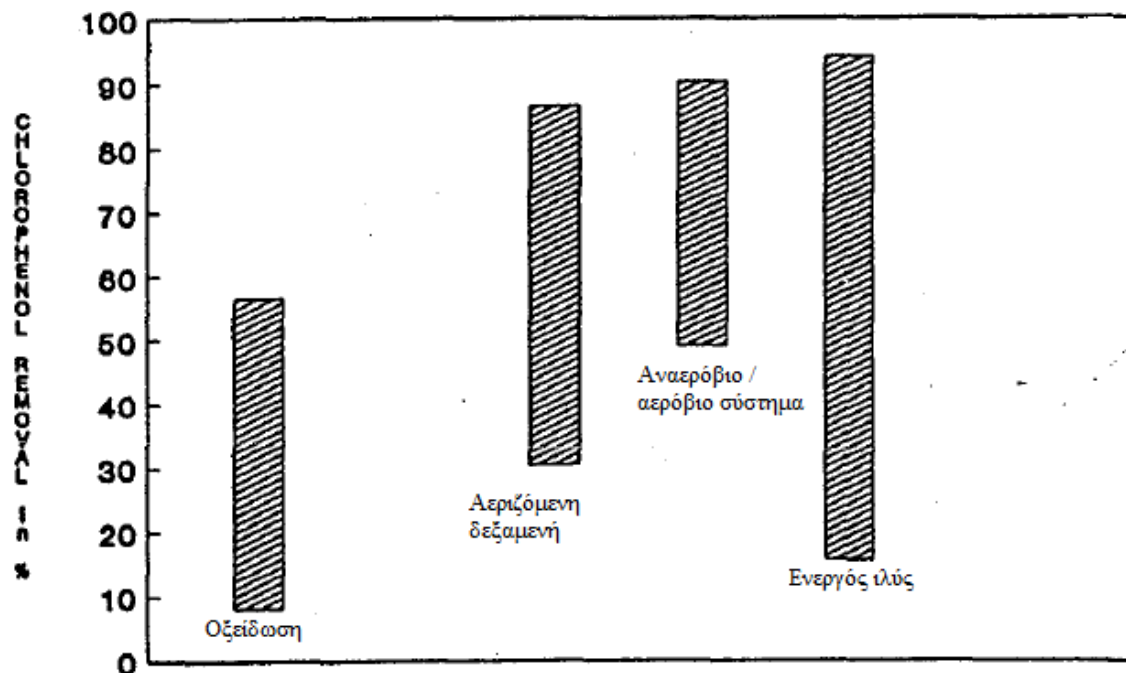
Σχήμα 5.82. Εύρος αφαίρεσης AOX για διάφορους συνδυασμούς συστημάτων επεξεργασίας



Σύστημα επεξεργασίας
Πηγή: Wilson D.G, 1992

Στο Σχήμα 5.83 φαίνεται η αποτελεσματικότητα αφαίρεσης των χλωριωμένων φαινολών για διάφορα συστήματα επεξεργασίας. Η υψηλότερη αποτελεσματικότητα σημειώνεται για τα αναερόβια / αερόβια συστήματα και την ενεργό ιλύ.

Σχήμα 5.83. Εύρος αφαίρεσης χλωροφαινολών για διάφορα συστήματα επεξεργασίας



Πηγή: Wilson D.G, 1992

6.7 Κόστος και απόδοση συστημάτων επεξεργασίας αέριων αποβλήτων

Στον Πίνακα 5.75 δίνονται δεδομένα σχετικά με το χρήσιμο αποτέλεσμα και το κόστος διάφορων τεχνολογιών ελέγχου. Για να συμπεράνουμε ποια εναλλακτική πρέπει να επιλεγεί για κάθε εκπομπή, πρέπει να εξετάσουμε ξεχωριστά την κάθε πηγή.

Για παράδειγμα, οι εκπομπές TRS από χωνευτές και εξατμιστές (μύλοι kraft πολτοποίησης) μπορούν να μειωθούν με συμπύκνωση. Τα μη – συμπυκνωμένα στοιχεία είναι μικρού όγκου, πηγές υψηλής συγκέντρωσης, και επομένως εύκολα στην επεξεργασία (συνήθως με αποτέφρωση).

Τα μεγάλου όγκου αέρια από το φούρνο ανάκτησης είναι πιο δύσκολα στην επεξεργασία, και τα καλύτερα αποτελέσματα επιτυγχάνονται μειώνοντας τις εκπομπές στην πηγή με τέτοια μέσα όπως οξείδωση μαύρου διαλύματος, σχεδιασμός λέβητα ανάκτησης χαμηλών οσμών και σωστή λειτουργία του φούρνου ανάκτησης. Ο σχηματισμός οξειδίων του αζώτου, σε αναφορά με τους λέβητες ανάκτησης, τους λέβητες ισχύος και τις ασβεστοκάμινους, μπορεί επαρκώς να ελεγχθεί χωρίς την απαίτηση εξωτερικής επεξεργασίας με το χειρισμό των μονάδων καύσης με ελάχιστη θερμοκρασία φλόγας και ελάχιστη περίσσεια αέρα. (European Commission, Μάιος 1992)

Πίνακας 5.75. Απόδοση και κόστος τεχνικών ελέγχου αέριων εκπομπών

ΕΛΕΓΧΟΣ	ΑΠΟΔΟΣΗ (%)	ΚΟΣΤΟΣ
Πλυντρίδα	80 - 99	+++
Ηλεκτροστατικός διαχωριστής	91 - 99 +	++
Κυκλώνας	65 - 95	+
Σακκόφιλτρα	99 +	+++
Συμπύκνωση	- 90	+
Αποτέφρωση	90 - 99	+++
Χλωρίωση	- 99	+++
Προσρόφιση, ενεργός άνθρακας	- 99 +	+++

+++ = ακριβό
 ++ = μέτριου κόστους
 + = φθηνό

Πηγή: European Commission, Μάιος 1992

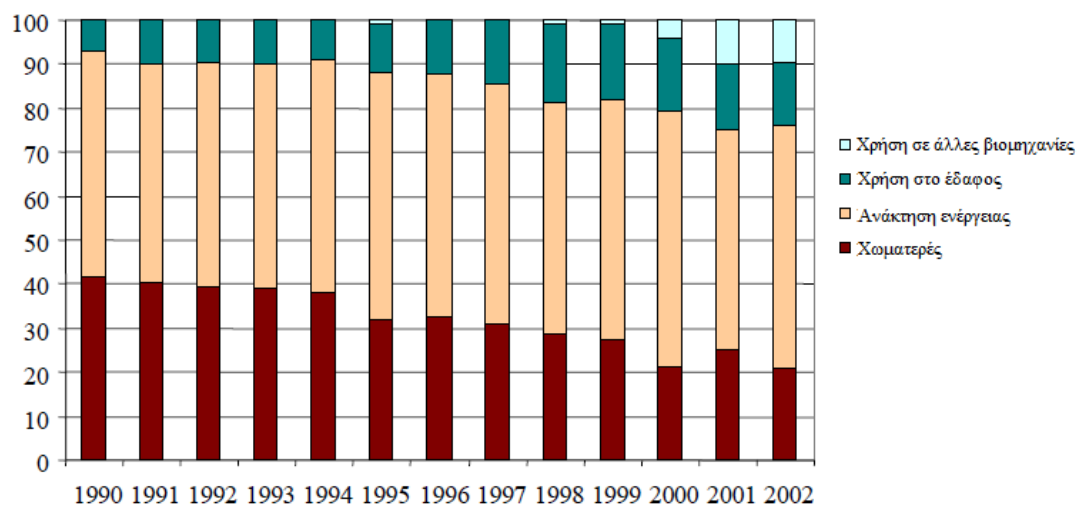
7 Εναλλακτικές πηγές διαχείρισης αποβλήτων χαρτοβιομηχανίας

7.1 Εισαγωγή

Η περισσότερη έρευνα στην περιοχή διαχείρισης των αποβλήτων επικεντρώνεται σε συμβατικές εναλλακτικές, όπως η υγειονομική ταφή, η καύση ή η αποτέφρωση. Όμως, η ποσότητα αποβλήτων που απορρίπτεται στις χωματερές συνεχώς μειώνεται στην Ευρώπη, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.1, υπέρ της χρήσης τους ως δευτερεύουσες πρώτες ύλες σε άλλες βιομηχανίες και άλλες εφαρμογές.

Σχήμα 6.1. Εφαρμογές των υπολειμμάτων της βιομηχανίας πολτού και χάρτου

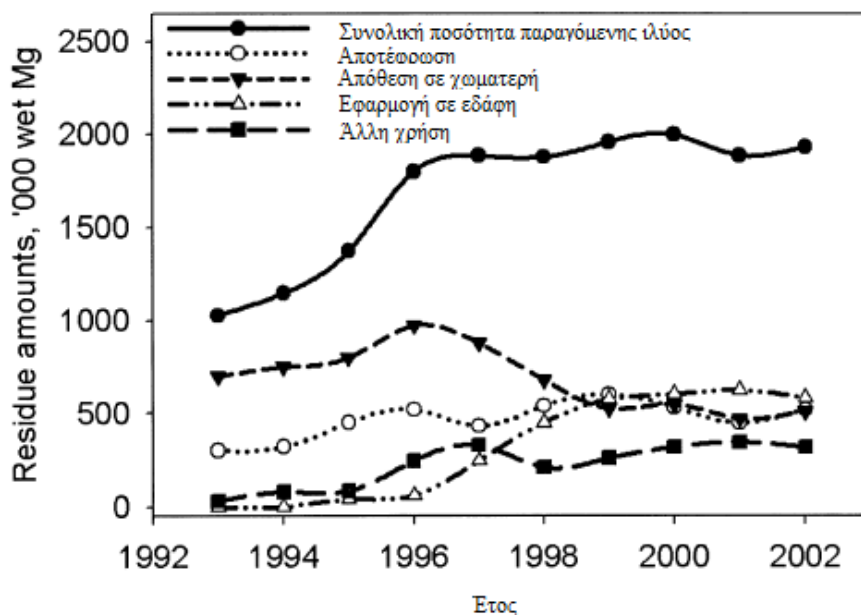
Υπολείμματα πολτού και χάρτου (%)



7.2 Ωφέλιμες χρήσεις ιλύος

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 6.2, η συνολική ποσότητα παραγόμενης ιλύος συνεχώς αυξάνει με αποτέλεσμα να υπάρχει μεγάλο ενδιαφέρον για το πού καταλήγει. Έτσι, παρόλο που η απόθεση σε χωματερές χρησιμοποιούταν παλιότερα αρκετά συχνά, στις μέρες μας, παρατηρείται αυξημένη προσπάθεια για τη χρήση της ιλύος σε κερδοφόρες και ωφέλιμες εφαρμογές. (Camberato J. J., Απρίλιος 2006).

Σχήμα 6.2. Χρήση ιλύος



Πηγή: Camberato J. J., Απρίλιος 2006

7.2.1 Παραγωγή κεραμικών και υλικών κατασκευών

Κάποιο ελαφρύ συσσωμάτωμα, που περιέχεται σε υλικά κατασκευών, όπως τσιμέντο, τούβλα, κεραμικά και σκυρόδεμα, χρησιμοποιεί την ιλύ ως συστατικό του.

Η χρήση ιλύος σε προϊόντα κατασκευών ακολουθεί τρεις γενικές τεχνικές. Μία μέθοδος είναι η χρήση ιλύος σαν πρώτη ύλη σε κάμινο τσιμέντου. Πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή τσιμέντου περιλαμβάνουν το ανθρακικό ασβέστιο, τον άργιλο, το πυρίτιο και μικρότερες ποσότητες αλουμινίου και σιδήρου. Η ιλύς περιέχει σημαντικές ποσότητες αυτών των προϊόντων.

Άλλη εναλλακτική είναι η χρήση ιλύος σε τσιμεντογενή προϊόντα. Υπάρχει ευρεία έρευνα της χρήσης οργανικών ινών που περιλαμβάνουν πολτό ξύλο σε τσιμεντογενή συστατικά. Πιθανά πλεονεκτήματα πρόσθεσης οργανικών ινών σε τσιμεντογενή σύνθετα περιλαμβάνουν την αυξημένη διάρκεια ζωής και τον μειωμένο ρυθμό συστολής – διαστολής.

Η παραγωγή ελαφρού συσσωματώματος χρησιμοποιεί επίσης ιλύ. Το αδρανές συσσωμάτωμα είναι ένας όρος που περιγράφει την συλλογή υλικών που χρησιμοποιούνται σαν τονωτικά στα κατασκευαστικά υλικά.

Ερευνητές του πανεπιστημίου της Χαέν (Ισπανία) έχουν αναμείξει ιλύ με κεραμικά υλικά που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία κατασκευών. Το αποτέλεσμα είναι ένα τούβλο (Εικόνα 6.1) που έχει χαμηλή θερμική αγωγιμότητα δηλαδή δρα ως καλός μονωτής. Ωστόσο, η μηχανική αντοχή του απαιτεί περαιτέρω βελτίωση. Οι επιστήμονες συνέλεξαν την ιλύ, την ανέμιξαν με πηλό και πέρασαν το μίγμα από μία μηχανή πίεσης ώστε να δημιουργήσουν τούβλα. Ένα από τα πλεονεκτήματα της προσθήκης ιλύος στα τούβλα είναι ότι παρέχει ενέργεια λόγω του οργανικού υλικού που περιέχει. Αυτό θα μπορούσε να βοηθήσει να μειωθεί η κατανάλωση καυσίμου και ο χρόνος που απαιτείται για την παραγωγή τούβλων. Υπάρχουν ακόμα μερικά προβλήματα όσον αφορά την προσκόλληση και την διαμόρφωση των τούβλων εκείνων που έχουν μεγάλη περιεκτικότητα ιλύος.

Εικόνα 6.1. Τούβλο μετά από προσθήκη ιλύος



7.2.2 Πελλετοποίηση

Η πελλετοποίηση ενός ή συνδυασμένων ιλύων δεν είναι και καινούριο στην βιομηχανία πολτού και χάρτου. Κάποιοι λόγοι για την παραγωγή πελλετών ιλύος είναι:

- Μείωση όγκου
- Έλεγχος οσμών
- Ανάκτηση καυσίμου

Ο πιο κοινός λόγος για την παραγωγή πελλετών είναι η χρήση σαν εναλλακτικό καύσιμο.

Ένας μύλος μεταφέρει αφυδατωμένη ιλύ σε ένα μύλο πελλετών για το στέγνωμα και την δημιουργίας τους. Οι τελικές πελλέτες περιέχουν 15-20% υγρασία και 10% τέφρα. Έχουν $14,7 \times 10^6$ J/kg θερμαντική αξία.

Μίγματα από ιλύ και μη ανακυκλώσιμο χαρτί μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την δημιουργία πελλετών καυσίμου. Χρησιμοποιούνται ως εναλλακτικό καύσιμο θερμοστών και καυστήρων κονιοποιημένου άνθρακα. Το ποσό ιλύος σε αυτές τις πελλέτες είναι 10-66%. Μεταβάλλοντας την περιεκτικότητα ιλύος και τον βαθμό μη ανακυκλώσιμου χαρτιού ελέγχεται η περιεκτικότητα σε καύσιμο. Οι τελικές πελλέτες φέρουν $14-23 \times 10^6$ J/kg. Έχει αναπτυχθεί διεργασία που μετατρέπει την ιλύ από ανακτημένο χαρτί σε ένα κοκκώδες υλικό, που χρησιμοποιείται ως υλικό – φορέας σε γεωργικά ζιζανιοκτόνα. Θεωρείται ανώτερο από τα συμβατικά υλικά – φορείς, όπως άργιλο, βερμικουλίτη κτλ, γιατί δεν περιέχει σκόνη και είναι ανθεκτικό στην τριβή.

7.2.3 Κομποστοποίηση

Οι ιλεις από πολτομάζα και χαρτί μπορούν να επεξεργαστούν από καλά ελεγχόμενες τεχνικές κομποστοποίησης. Ένα εργοστάσιο κομποστοποιεί τουλάχιστον το 50% της ιλύος του. Η διαδικασία περιλαμβάνει την ομογενοποίηση της ιλύος με μεταβαλλόμενες αναλογίες άμμου, χαλκικού και λιπάσματος για την παραγωγή συνθετικού χώματος.

7.2.4 Παραγωγή αιθανόλης

Η αιθανόλη είναι ένα κοινό προσθετικό στην βενζίνη. Οι παραδοσιακές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αιθανόλης περιλαμβάνουν την ζύμωση σακχάρων εξόζης προερχόμενα από άμυλα ή σιρόπια. Προσπάθειες για την μείωση κόστους παραγωγής και για να γίνει πιο ευρεία διαθέσιμη η αιθανόλη οδήγησαν στην παραγωγή της από μη παραδοσιακές πρώτες ύλης κυτταρίνης, όπως την ιλύ από πολτομάζα ή χαρτί. Η χρήση πρωτογενούς ιλύος ως πρώτη ύλη για την παραγωγή αιθανόλης πλεονεκτεί για τους παρακάτω λόγους:

- Είναι ευρεία διαθέσιμη σε επαρκή ποσότητα.
- Έχει λίγη ή και καθόλου οικονομική αξία. Σε κάποιες περιπτώσεις υπάρχει και ποσό πληρωμής για την διαχείρισή της.
- Όταν το ινώδες συστατικό της ιλύος περιέχει χημικά πολτοποιημένο ξύλο, μόνο ένα ποσό λιγνίνης υπάρχει συγκρινόμενο με το μη πολτοποιημένο ή μηχανικά πολτοποιημένο ξύλο.

7.2.5 Παραγωγή ζωικών τροφών

Υπάρχουν δύο βασικές τεχνικές για την χρήση ιλύος σε ζωικές τροφές. Η πρώτη είναι να ενσωματωθεί η ιλύς απευθείας σε μίγμα ζωικών τροφών. Αυτή η μέθοδος εκμεταλλεύεται την παρουσία υδατανθράκων που είναι υπό τη μορφή κυτταρίνης και άλλων θρεπτικών συστατικών στην πρωτογενή ή συνδυασμένη ιλύ. Η ευπεψιμότητα της ιλύος συνδέεται ανάλογα με την περιεκτικότητα σε υδατάνθρακες με την περιεκτικότητα σε τέφρα και λιγνίνη.

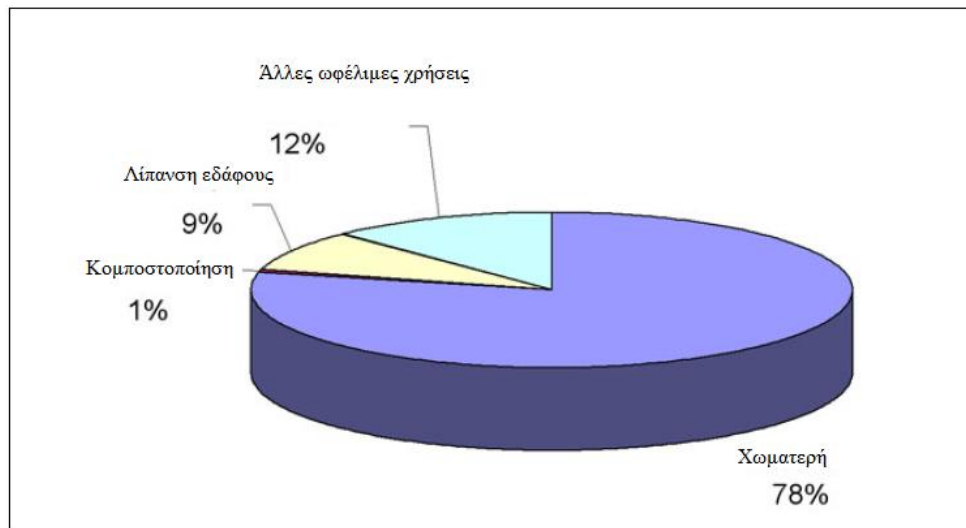
Μία δεύτερη μέθοδος χρήσης ιλύος στις ζωικές τροφές περιλαμβάνει την παραγωγή κυτταρικής πρωτεΐνης, που είναι παρούσα στην δευτερογενή ιλύ και προέρχεται από τη ζύμωση της ινώδους ιλύος. Είναι δυνατή η ξήρανση αυτών των πρωτεϊνών και η πρόσθεσή τους σε μίγματα τροφών. Μηχανικά αφυδατώνοντας την δευτερογενή ιλύ σε 12% στερεό και εισάγοντας μίγμα ιλύος και λαδιού σε ειδικά σχεδιασμένους αποστακτήρες, παράγεται 45% πρωτεϊνικό υλικό. Με φυγοκέντρηση ελευθερώνονται 83% στερεές ουσίες, 1% νερό και 16% λάδι.

7.3 Τέφρα

Η τέφρα είναι ένα χρήσιμο γεωτεχνικό υλικό κατασκευών. Επισημαίνεται ότι για την διατήρηση ευστάθειας είναι κρίσιμα σημαντικό να παραμείνει η τέφρα μη κορεσμένη με το νερό.

Έρευνα του 2002 βρήκε ότι μόνο 22% της παραγόμενης τέφρας χρησιμοποιείται για ωφέλιμους σκοπούς (Σχήμα 6.3). Οι αναγνωρισμένες ωφέλιμες χρήσεις περιλαμβάνουν κομποστοποίηση (βελτίωση χρώματος και οσμών), στεγανοποίηση χωματερών, κατασκευή δρόμων και λίπανση εδάφους. Η πλειοψηφία της τέφρας (78%) απορρίπτεται σε χωματερή. (Allan Elliot, Οκτώβριος 2006)

Σχήμα 6.3. Χρήσεις τέφρας



Πηγή: Allan Elliot, Οκτώβριος 2006

Η χρήση τέφρας από τη βιομηχανία πολτού και χαρτιού ως υλικό κατασκευής, όπως τσιμέντο, τούβλα είναι περιορισμένη. Ο κύριος λόγος για αυτό είναι οι υψηλές συγκεντρώσεις άκαυστου άνθρακα που κυμαίνονται από 10 – 50%. Ο άνθρακας εμπλέκεται με τις ποζολανικές ιδιότητες (σκλήρυνση του υλικού με νερό υπό την παρουσία αλκαλικής ουσίας) και έτσι μειώνει την αντοχή του υλικού. Μία περιεκτικότητα σε άνθρακα σχεδόν 6% θεωρείται ως το άνω όριο για την χρήση σε κατασκευή τσιμέντου.

Πριν η τέφρα χρησιμοποιηθεί ως υλικό κατασκευής, πρέπει να καλύπτει κάποια κριτήρια όπως περιεκτικότητα σε υγρασία, πυκνότητα, βαθμός ρύπανσης και εκπλυσιμότητα. Η τέφρα από λέβητες καύσης ξύλου βρέθηκε να είναι αποτελεσματική ως υλικό κατασκευής δρόμων. Ο βέλτιστος ρυθμός πρόσθεσης είναι 10% του συμβατικού υλικού, δίνοντας στο δρόμο αντοχή.

Η ανακύκλωση τέφρας από λέβητες χρησιμοποιώντας απόβλητα ξύλου ως καύσιμο σε αναδασωμένες περιοχές φαίνεται να είναι ευνοϊκή περιβαλλοντικά, αφού επιστρέφει στο έδαφος τα θρεπτικά συστατικά που αφαιρούνται όταν τα δέντρα κόβονται. Αυτή η πρακτική εγκαθιστά ένα αυτοσυντηρούμενο δάσος, με το επιπρόσθετο πλεονέκτημα της μείωσης των συνεπειών της όξινης βροχής λόγω της αλκαλικότητας της τέφρας.

Η τέφρα λέβητα από καυστήρα βιομάζας με καύσιμο που αποτελείται από απόβλητα ξύλου, οι απορρίψεις της πρωτοβάθμιας επεξεργασίας και λάδι χρησιμοποιούνται στην παραγωγή κομποστοποιήσιμων προϊόντων.

Η ανάμειξη τέφρας με υπολείμματα επεξεργασίας αποβλήτων προκαλεί ένα προϊόν πλούσιο σε θρεπτικές ουσίες (K, Ca και Mg) και αλκαλικότητα (και τα δύο προέρχονται από την τέφρα) όπως επίσης N και P (από υπολείμματα επεξεργασιών), που κάνουν το μίγμα ένα άριστο λίπασμα εδάφους.

Επίσης, η τέφρα πλούσια σε άνθρακα είναι αποτελεσματική στην αφαίρεση χρώματος και ενός μέρους COD στο μύλο λεύκανσης.

Τα κύρια οξείδια που είναι παρόντα στην τέφρα πολτού και χάρτου είναι τα CaO , Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 , Fe_2O_3 και P_2O_5 και παράγονται σε μηδαμινές ποσότητες. Όλα αυτά τα οξείδια είναι

αποτελεσματικά αντιδραστήρια πυρογέννησης για την κατασκευή γυαλιού και κεραμικών προϊόντων. Η τέφρα που προκύπτει από την αποτέφρωση ιλύων χαρτιού μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πληρωτικό μέσο χαρτιού. Όμως, όταν τα αρχικά πληρωτικά μέσα αντικαθίστανται από τέφρα, η διαύγεια του προϊόντος αλλάζει. Η βέλτιστη θερμοκρασία καύσης για την παραγωγή τέφρας υψηλής ποιότητας είναι 600 °C.

8 Συμπέρασμα και μελλοντικές προτάσεις και έρευνα

Η εργασία αυτή είχε ως σκοπό την παρουσίαση και ανάλυση όλων των τεχνικών επεξεργασίας των αποβλήτων της βιομηχανίας χάρτου. Έτσι, αρχίζοντας με μία ιστορική αναδρομή στην παραγωγή του χαρτιού, παρουσιάστηκαν οι σημερινές μέθοδοι παραγωγής του αλλά και τα απόβλητα που παράγονται από αυτήν τη διαδικασία, τα οποία είναι και ανεπιθύμητα.

Για το λόγο αυτό, αναλύθηκαν οι μέθοδοι πρόληψης δημιουργίας των αποβλήτων και έπειτα οι τρόποι αντιμετώπισής τους με απώτερο σκοπό την εξάλειψή τους. Τέλος, αναφέρονται και κάποιοι τρόποι αξιοποίησης κάποιων αποβλήτων, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν πρώτες ύλες για την παραγωγή κάποιων άλλων προϊόντων.

Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι τα απόβλητα είτε δεν μπορούν να εξαλειφθούν πλήρως ή οι μέθοδοι που χρειάζονται είναι αρκετά ακριβές και δεν εφαρμόζονται.

Τα στερεά απόβλητα αντιμετωπίζονται βέλτιστα με τη μέθοδο της αποτέφρωσης αλλά και η συγκεκριμένη μέθοδος παράγει απαέρια τα οποία θεωρούνται ρύποι, με αποτέλεσμα να πρέπει να εφαρμοστεί υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Τα αέρια απόβλητα αντιμετωπίζονται βέλτιστα με σακκόφιλτρα ή για χαμηλότερο κόστος αλλά παρόμοια απόδοση με ηλεκτροστατικούς διαχωριστές. Τέλος, τα υγρά απόβλητα θεωρούνται τα πιο δύσκολα στην εξάλειψή τους. Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση τους χρειάζονται πολλαπλά στάδια επεξεργασίας.

Το κυριότερο όμως συμπέρασμα είναι ότι η αντιμετώπιση των αποβλήτων μπορεί να γίνει αποτελεσματικότερα μέσω κυρίως της πρόληψης, δηλαδή κατά τη διάρκεια της παραγωγής του χαρτιού είναι σημαντικό να παρθούν μέτρα έτσι ώστε τα απόβλητα που δημιουργούνται να είναι ελάχιστα ή να περιέχουν τέτοιες χημικές ουσίες που να αποσυνθέτονται πιο εύκολα.

Επίσης, η συγκεκριμένη εργασία μπορεί να αποφέρει σημαντική βοήθεια κυρίως ως βάση για πληροφορίες και ενημέρωση αναφορικά με διάφορες μεθόδους αντιμετώπισης των αποβλήτων οι οποίες ακόμα βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο, όπως και το ποια μέθοδος αντιμετώπισης μπορεί να θεωρηθεί η πιο αξιόπιστη ανάλογα τα χημικά χαρακτηριστικά των αποβλήτων που διαθέτει ένα εργοστάσιο. Μπορεί να αποτελέσει μία σημαντική πηγή βιβλιογραφίας, αφού παραθέτονται όλες οι δυνατές μέθοδοι με τα προτερήματα και μειονεκτήματά τους, την αξιοπιστία τους και τα αποτελέσματά τους, βασιζόμενα σε γραφήματα και μετρήσεις.

Όσον αφορά, μελλοντικές εργασίες που μπορούν να αναπτυχθούν και να ασχοληθούν με τις διεργασίες αντιμετώπισης των αποβλήτων, μπορούν να εστιαστούν στις τεχνολογίες πρόληψης ρύπανσης, τις Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές, επειδή το συγκεκριμένο στάδιο θεωρείται πολύ σημαντικό για τη δημιουργία των αποβλήτων και αν εκεί υπάρξει μία επιτυχής, αποτελεσματική και σχετικά οικονομική εφαρμόσιμη μέθοδος, τα απόβλητα που θα παραχθούν θα μειωθούν κατά πολύ. Έτσι, στον ίδιο χώρο παραγωγής του χαρτιού θα μπορεί να γίνει και η αντιμετώπιση και των αποβλήτων με πολύ μικρότερο κόστος.

Επίσης, έρευνα μπορεί να γίνει και για την ανακύκλωση κάποιων αποβλήτων ή την επαναχρησιμοποίησή τους, αφού μπορούν να θεωρηθούν πρώτες ύλες για την παραγωγή άλλων προϊόντων, ή ακόμα και να χρησιμοποιηθούν ως καύσιμα. Επιπρόσθετα, σημαντική είναι η αντικατάσταση ουσιών στην παραγωγική διαδικασία από άλλες οι οποίες είναι λιγότερο βλαβερές για το περιβάλλον. Κυρίως, πρέπει να ερευνηθεί κατά πόσο η ποιότητα

του χαρτιού θα μεταβληθεί αν χρησιμοποιηθούν για παράδειγμα συγκεκριμένα προσθετικά τα οποία μπορούν να αντιμετωπιστούν πιο εύκολα.

Σημαντικό θέμα επίσης αποτελεί η χρήση και η ανακύκλωση του νερού σε όλη την παραγωγική διαδικασία, αφού η ποσότητα που χρησιμοποιείται είναι σημαντική και λόγω της έλλειψής του, θεωρείται ένα αγαθό που η χρήση του πρέπει να γίνεται μέσα σε λογικά όρια και ίσως να πρέπει να εξεταστούν και κάποιες μέθοδοι για τον καθαρισμό του και την επαναχρησιμοποίηση του.

Σημασία έχει η μέτρηση και οριοθέτηση των ρύπων που παράγουν οι ήδη εφαρμοζόμενες μέθοδοι επεξεργασίας, με αποτέλεσμα να αποτελεί ένα μελλοντικό θέμα εργασίας ώστε αυτές που δημιουργούν αρκετά απόβλητα να περιοριστούν ή να αντικατασταθούν από άλλες που θα είναι πιο αποτελεσματικές και δεν θα επιβαρύνουν περαιτέρω το περιβάλλον.

Τέλος, περαιτέρω έρευνα χρειάζεται η τριτοβάθμια επεξεργασία ή και τα υβρισικά συστήματα, τα οποία δεν χρησιμοποιούνται κατά κόρον, λόγω του υψηλού κόστους που φέρουν, αλλά έχουν πολύ σημαντικά αποτελέσματα αφού μπορούν να εξαλείψουν σε μεγάλο βαθμό τα απόβλητα. Επομένως, πρέπει να ερευνηθούν τεχνολογίες αποδοτικές αλλά με χαμηλότερο κόστος κατά την εφαρμογή τους.

Βιβλιογραφία

[1] 2012 AF&PA, Sustainability Report

[2] Καπετάνιος Ευάγγελος, Σημειώσεις Μαθήματος Τεχνικών Αντιρρύπανσης, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Συστήματα Αυτοματισμού, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2013

[3] Νταρακάς Ευθύμιος, 'ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ', Σημειώσεις, ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ & ΤΕΧΝΙΚΗΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ, Θεσσαλονίκη 2006

[4] Abbassi E. Bassi, 'Improvement of Anaerobic Sludge Digestion by Disintegration of Activated Sludge using Vacuum Process', Water Qual. Res. J. Canada, 2003 Volume 38, No. 3, 515–526

[5] ALI Arshad, HASHMI Hashim Nisar, BAIG Naseem, 'Treatment of the paper mill effluent – a review', International journal of engineering, Tome XI (2013)

[6] Amat A.M., Arques A., Lopez F., Miranda M.A., 'Solar photo-catalysis to remove paper mill wastewater pollutants', Φεβρουάριος 2005

[7] BELÉM A., PANTELEITCHOUK A.V., DUARTE A.C., ROCHA-SANTOS T.A.P., FREITAS A.C., 'TREATMENT OF THE EFFLUENT FROM A KRAFT BLEACH PLANT WITH WHITE ROT FUNGI *Pleurotus sajor caju* AND *Pleurotus ostreatus*', Global NEST Journal, Vol 10, No 3, pp 426-431, 2008

[8] Biotechnology Industry Organization, 'New biotech tools for a cleaner environment', Ιούλιος 2002

[9] Camberato J. J., Gagnon B., Angers D. A., Chantigny M. H., and Pan W. L., 'Pulp and paper mill by-products as soil amendments and plant nutrient sources', Technical Contribution No. 5126 of the Clemson University Experiment Station, 11 Απριλίου 2006

- [10] Chelliapan Shreeshivadasan, Mahat Siti Baizura, Din Md. Fadgil Md., Yuzir A., and Othman N., 'Anaerobic Digestion of Paper Mill Wastewater', *Iranica Journal of Energy & Environment* 3 (Special Issue on Environmental Technology): 85-90, 2012
- [11] Elliot Allan, Mahmood Talat, 'Beneficial uses of pulp and paper power boiler ash residues', *Taappi Journal*, Οκτώβριος 2006
- [12] Elliot Allan, Mahmood Talt, 'Pretreatment technologies for advancing anaerobic digestion of pulp and paper biotreatment residues', 2007 Elsevier Ltd
- [13] European Commission, 'Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board', *Industrial Emissions Directive 2010/75/EU*, Ιούλιος 2013
- [14] European Commission, 'Technical and economic study on the reduction, based on best available technology, of industrial emissions (water, air and solid wastes) from the pulp industry', *Royal Dutch Consulting Engineers and Architects*, Μάιος 1992
- [15] European Commission, 'Reference Document on Best Available Techniques in the Pulp and Paper Industry', Δεκέμβριος 2001
- [16] Gaudreault Caroline, 'Environmental Challenges – Pulp & Paper Industry', *Program for North American Mobility in Higher Education Introducing Process Integration for Environmental Control in Engineering Curricula*, 2003
- [17] Hegazy Badr El-Din E., Hefny Rehab M. El-, 'A New Design Of Biological Bed Treatment Of Municipal Wastewater', *Journal of Applied Sciences Research*, 9(4): 2819-2824, 2013
- [18] Industrial Technologies Program, 'Energy and environmental profile of the US pulp and paper industry', Δεκέμβριος 2005
- [19] Ince Bahar K., Cetecioglu Zeynep and Ince Orhan, 'Pollution Prevention in the Pulp and Paper Industries', *Bogazici University, Institute of Environmental Science, Istanbul, Istanbul Technical University, Environmental Engineering Department, Istanbul, Turkey*

- [20] International Finance Corporation, 'Environmental, Health and Safety Guidelines Pulp and Paper Mills', Δεκέμβριος 2007
- [21] Kemmadamrong Praphon and Deesomsak Kanchit, 'Performance study of wastewater treatment of upflow aerated sand – media biofilter', WISA 2000, Sun City, South Africa, 28 Μαΐου – 1 Ιουνίου 2000
- [22] Keskitalo Jukka and Leiviskä Kauko, 'Mechanistic modelling of pulp and paper mill wastewater treatment plants', Report A No 41, Ιανουάριος 2010
- [23] Kumar P., Kumar S., and Bhardwaj N. K., 'Advanced Oxidation of ECF Bleaching Wastewater Using TiO₂ Photocatalysis', International Journal of Environmental Science and Development, Vol. 3, No. 5, Οκτώβριος 2012
- [24] Talat Mahmood, Allan Elliott, 'A review of secondary sludge reduction technologies for the pulp and paper industry', 2006 Elsevier Ltd
- [25] McCubbin Neil, Edde Howard, Barnes Ed, Folke Jens, Bergman Eva, Owen Dennis, 'Best available technology for the Ontario pulp and paper industry', N. McCubbin Consultants Inc.
- [26] Mladenov M., Pelovski Y. 'UTILIZATION OF WASTES FROM PULP AND PAPER INDUSTRY', Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, 45, 1, 2010, 33-38
- [27] Mobius Christian H., 'Water use and wastewater treatment in papermills', Herstellung und Verlag: Books on demand, 2006
- [28] Osorio Francisco, Hontoria Ernesto, 'Optimization of Bed Material Height in a Submerged Biological Aerated Filter', Journal of Engineering, Volume 27
- [29] Sappi, 'Water use and treatment in the pulp and paper industry', Volume 5, Αύγουστος 2012
- [30] Saravanan V. and Sreekrishnan T.R., 'Bio-physico-chemical treatment for removal of colour from pulp and paper mill effluents', Journal of scientific and industrial research Vol.64, Ιανουάριος 2005

- [31] Singh Pratibha, 'Sequential anaerobic and aerobic treatment of pulp and paper mill effluent in pilot scale bioreactor', Journal of Environmental Biology, Ιανουάριος 2007
- [32] Torrades Francesc, Peral José, Pérez Montserrat, Domènech Xavier, Hortal José A. Garcia, and Riva Maria C., 'REMOVAL OF ORGANIC CONTAMINANTS IN BLEACHED KRAFT EFFLUENTS USING HETEROGENEOUS PHOTOCATALYSIS AND OZONE ', 2001 TAPPI JOURNAL PEER REVIEWED PAPER
- [33] United States Environmental Protection Agency, 'Pulping and Bleaching System for the Pulp and Paper Industry: A Plain English Description', Office of Air Quality Planning and Standards Research Triangle Park, Σεπτέμβριος 2001
- [34] Wang Lawrence K., Hung Yung –Tse, Shammass Nazih K., 'Handbook of advanced industrial and hazardous wastes treatment', CRC Press
- [35] Wang Lawrence K., Shammass Nazih K., Selke William A., Aulenbach Donald B., 'Flotation Technology', Volume 12, Handbook OF environmental engineering, 2010
- [36] Wei X.M., Lin C., Duan N., Peng Y.X., Ye Z.Y, 'Application of anaerobic biological filter for treating swine farms wastewater', Procedia Engineering 01 (2010) 1651–1665, Science Direct, Elsevier
- [37] Wiegand Paul S. and Unwin Jay P., 'Alternative management of pulp and paper industry solid wastes', Solid Waste Management, Vol. 77, No. 4 Tappi Journal
- [38] Wilson D.G , Holloran M.F, 'Decrease of AOX with various external effluent treatments', Pulp and Paper Canada 93:12, 1992