

2018

Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Πολυτεχνική Σχολή
Τμήμα Μηχανολόγων
Μηχανικών

Κατσαούνης Αναστάσιος
Λευθήρης Θεόδωρος



ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

Διπλωματική
Εργασία

Υπεβλήθη για την



ΠΑΝΕΠΗΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ

υπό

ΚΑΤΣΑΟΥΝΗ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟ

ΛΕΥΘΕΡΗ ΘΕΟΔΩΡΟ

Διπλωματική Εργασία

Υπεβλήθη για την εκπλήρωση μέρους των
απαιτήσεων για την απόκτηση
του Διπλώματος του Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2018

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος Εξεταστής (Συνεπιβλέπων)	Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Δεύτερος Εξεταστής (Συνεπιβλέπων)	Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
Τρίτος Εξεταστής	Δρ. Νικόλαος Πελεκάσης Καθηγητής, Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Εξοικονόμηση Ενέργειας στην Τσιμεντοβιομηχανία

Κατσαούνης Αναστάσιος, Λευθήρης Θεόδωρος

Επιβλέπων Καθηγητής: Δρ. Βασίλειος Μποντόζογλου, Δρ. Νικόλαος Ανδρίτσος

Περίληψη

Όπως είναι γνωστό, το τσιμέντο είναι ένα υδραυλικό συνδετικό υλικό και βασικό συστατικό των σκυροδεμάτων και των κονιαμάτων. Διάφορα συστατικά χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες για την παραγωγή του τσιμέντου, έτσι ώστε το τελικό προϊόν να έχει την κατάλληλη χημική σύσταση. Αυτά τα συστατικά αλέθονται σε μικρού μεγέθους σωματίδια για να αναμιγνύονται και να αντιδρούν ευκολότερα. Το τελικό μίγμα τροφοδοτείται στην περιστροφική κάμινο (rotary kiln), στην οποία επικρατούν υψηλές συνθήκες θερμοκρασίας. Οι υψηλές αυτές θερμοκρασίες μπορούν να μεταβάλουν την επιθυμητή σύσταση (που έχει προσδιοριστεί αρχικά από τον κατασκευαστή) των αρχικών συστατικών, καθώς καίγονται και ένα μέρος τους αντικαθίσταται από οξυγόνο που παρέχεται από τον αέρα.

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε μία τσιμεντοβιομηχανία και κατά επέκταση η παραγωγική διαδικασία που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.

Η ρύπανση του περιβάλλοντος είναι ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα στις μέρες μας. Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί σημαντικό κομμάτι της ρύπανσης του περιβάλλοντος με συνέπειες στην υγεία του ανθρώπου και των ζώων, στο οικοσύστημα, τις καλλιέργειες και στο κλίμα του πλανήτη. Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι οφείλονται εν μέρει στην ανθρώπινη δραστηριότητα αλλά και σε φυσικούς παράγοντες. Έχει αποδειχθεί ότι η ανθρώπινη δραστηριότητα παίζει μεγάλο ρόλο στην ατμοσφαιρική ρύπανση και γι' αυτό πρέπει να ληφθούν μέτρα για τον περιορισμό της. Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι μπορεί να είναι πρωτογενείς, που σε αυτήν την περίπτωση εκπέμπονται απευθείας στην ατμόσφαιρα, ή δευτερογενείς. Σε αυτή την περίπτωση ουσίες που αρχικά δεν είναι ρύποι μετατρέπονται σε ρύπους μετά από αντιδράσεις που γίνονται στην ατμόσφαιρα. Η βιομηχανική δραστηριότητα είναι ένας από τους κυριότερους ανθρώπινους παράγοντες δημιουργίας και απελευθέρωσης ατμοσφαιρικών ρύπων. Συγκεκριμένα, η τσιμεντοβιομηχανία είναι υπεύθυνη για μεγάλο μέρος του αποτυπώματος άνθρακα (carbon footprint), καθώς είναι μια άκρως ενεργοβόρα βιομηχανία. Πέρα από αυτό η διαδικασία παραγωγής τσιμέντου αυτή κάθε αυτή παράγει μεγάλα ποσά CO₂.

Στη συνέχεια θα αναφερθούν και θα αναλυθούν οι σημαντικότεροι αέριοι ρύποι και θα παρουσιαστούν δεδομένα συγκέντρωσής τους. Σε δεύτερη φάση θα αναρτηθεί η ευρωπαϊκή νομοθεσία για το περιβάλλον και τα όρια εκπομπών που επιβάλλουν. Σε τελικό στάδιο θα αναλυθεί η σημασία έρευνας κι εφαρμογής μεθόδων (BAT) για την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών αέριων ρύπων στην τσιμεντοβιομηχανία.

Η χρήση των εναλλακτικών καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία αναγνωρίζεται ευρέως για τα περιβαλλοντικά οφέλη [76] (CEMBUREAU, 1999). Τα εναλλακτικά καύσιμα αποδεσμεύουν την

τσιμεντοβιομηχανία από την αποκλειστική εξάρτησή της από τα ορυκτά και δημιουργούν νέες προοπτικές για την ικανοποίηση των ενεργειακών τους αναγκών.

Σε ένα εργοστάσιο τα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να μειώνουν τις συνολικές ενεργειακές ανάγκες του, αλλά ταυτόχρονα να μην επηρεάζουν αρνητικά το ρυθμό παραγωγής, την ποιότητα του προϊόντος και το περιβάλλον. Υπάρχουν τρεις βασικοί κλάδοι στους οποίους μπορούν να ενταχθούν τα διάφορα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας:

- βοηθητικός εξοπλισμός (κινητήρες, αντλίες, συμπιεστές κτλ.),
- έλεγχος της προοπτικής επένδυσης για νέο, λιγότερο ενεργοβόρο εξοπλισμό, σωστή λειτουργία και συντήρηση του,
- βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας με χρήση των Βέλτιστων Διαθέσιμων Τεχνικών (Best Available Techniques, BAT),
- συγχρονισμός και βέλτιστη συνεργασία μεταξύ των διαφόρων συστημάτων και διαδικασιών του εργοστασίου που οδηγεί στη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητάς τους.

Για την επίτευξη των οικονομικών και περιβαλλοντικών στόχων μίας επιχείρησης τόσο περίπλοκης όσο ένα εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου είναι απαραίτητη η σύσταση μιας δομημένης και οργανωμένης πολιτικής διαχείρισης ενέργειας, που στόχο έχει την καθιέρωση και τον έλεγχο μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας.

Μία δεύτερη κατηγοριοποίηση των τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας μπορεί να γίνει βάσει του σταδίου της παραγωγικής διαδικασίας στο οποίο εφαρμόζονται. Έτσι, βελτιώσεις μπορούν να επιτευχθούν στα ακόλουθα:

- συστήματα διαχείρισης ενέργειας,
- αποθήκευση και προετοιμασία των πρώτων υλών,
- αποθήκευση και προετοιμασία καυσίμων,
- μείωση της ενέργειας (π.χ. ανά τόνο τσιμέντου) που απαιτείται,
- τελική άλεση του τσιμέντου,
- γενικές τεχνικές,
- τροποποίηση του τελικού προϊόντος ή των πρώτων υλών,
- χρήση εναλλακτικών καυσίμων/πρώτων υλών.

Μία δευτερογενής πτυχή μεθόδων της εξοικονόμησης ενέργειας που συχνά παραβλέπεται, αλλά αν εφαρμοστεί σωστά οδηγεί σε αξιόλογα επίπεδα εξοικονόμησης, είναι η ενσωμάτωση του προσωπικού στην προσπάθεια αυτή. Το προσωπικό θα πρέπει να εκπαιδευτεί ώστε να χρησιμοποιεί με τον βέλτιστο αποδοτικό τρόπο τις σύγχρονες τεχνολογίες, καθώς και να ακολουθεί απλές μεθόδους εξοικονόμησης ενέργειας όπως να κλείνει τα φώτα κατά την αποχώρησή του από ένα χώρο και να κλείνει τις πόρτες και τα παράθυρα. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι αυτές οι

μέθοδοι δεν απαιτούν την επένδυση αρχικού κεφαλαίου. Είναι σύνηθες το φαινόμενο, κατά το οποίο παρά το γεγονός ότι οι αντίστοιχες μέθοδοι είναι γνωστές από τους μάνατζερ χαμηλού επιπέδου, δε μεταδίδονται αποδοτικά στο προσωπικό [98] (Cassal, 1995). Έχει παρατηρηθεί ότι ο βέλτιστος τρόπος θέσπισης τέτοιων κανόνων από το προσωπικό της εταιρείας είναι τα συστήματα επιβράβευσης.

Υπάρχουν διεθνώς αναγνωρισμένα συστήματα περιβαλλοντικής διαχείρισης, όπως το ISO14001, που βοηθούν τις εταιρείες να ελέγχουν την ενέργεια που καταναλώνουν και να εφαρμόζουν μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας.

Energy Saving in Cement Industry

Katsaounis Anastasios, Leftheris Theodoros

Supervisor: Dr. Vasilios Bontozoglou, Dr. Nikos Andritsos

Abstract

Cement is a basic material for building and civil engineering construction. After mining, grinding and homogenization of raw materials, the first step in cement manufacture, comes calcination of calcium carbonate followed by burning the resulting calcium oxide together with silica, alumina, and ferrous oxide at high temperatures to form clinker. The clinker is then ground or milled together with gypsum and other constituents to produce cement. Power station ash, blast furnace slag, and other process residues can also be used as partial replacements for the natural raw materials.

To produce 1 tonne of clinker the typical average consumption of raw materials in the EU is 1.57 tonnes. Most of the balance is lost from the process as carbon dioxide emission to air in the calcination reaction ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$). The cement industry is an energy intensive industry with energy typically accounting for 30-40% of production costs. Various fuels can be used to provide the heat required for the process. The most commonly used fuels are petcoke and coal followed by different types of waste, fuel oil, lignite and gas.

The clinker burning takes place in a rotary kiln which can be part of a wet or dry long kiln system, a semi-wet or semi-dry grate preheater (Lepol) kiln system, a dry suspension preheater kiln system or a preheater/precalciner kiln system. The best available technique for the production of cement clinker is considered to be a dry process kiln with multi-stage suspension preheating and precalcination. The wet process kilns operating in Europe are generally expected to be converted to dry process kiln systems when renewed, as are semi-dry and semi-wet processes kiln systems.

The clinker burning is the most important part of the process in terms of the key environmental issues for the manufacture of cement, energy use and emissions to air. The key environmental emissions are nitrogen oxides (NO_x), sulphur dioxide (SO_2) and dust. NO_x is a relatively new issue for the cement industry.

Many cement plants have adopted general primary measures, such as process control optimization, use of modern, gravimetric solid fuel feed systems, optimized cooler connections and use of power management systems. These measures are usually taken to improve clinker quality and lower production costs but they also reduce the energy use and air emissions.

The best available techniques for reducing NO_x emissions are a combination of general primary measures, primary measures to control NO_x emissions, staged combustion and selective non-catalytic reduction.

The best available techniques for reducing SO₂ emissions are a combination of general primary measures and absorbent addition. SO₂ emissions from cement plants are primarily determined by the content of the volatile sulphur in the raw materials. Kilns that use raw materials with little or no volatile sulphur have SO₂ emission levels well below this level without using abatement techniques.

The best available techniques for reducing dust emissions are a combination of general primary measures and efficient removal of particulate matter from point sources by application of electrostatic precipitators and/or fabric filters.

Our main consideration during the writing of our Thesis was to include solutions that achieve high energy efficiency taking into account the strict standards of emissions, while maintaining high quality cement.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	2
2.1 ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	2
2.2 ΣΤΑΔΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ	4
2.2.1 Πρώτο στάδιο - Εξόρυξη των πρώτων υλών.....	4
2.2.2 Δεύτερο στάδιο - Θραύση και άλεση των πρώτων υλών.....	5
2.2.3 Τρίτο στάδιο – Έψηση και παραγωγή κλίνκερ.....	6
2.2.3.1 Υγρή διεργασία	6
2.2.3.2 Ξηρή διεργασία.....	7
2.2.3.3 Ημι-ξηρή/υγρή διεργασία.....	7
2.2.4 Τέταρτο στάδιο - Τελική άλεση και διανομή.....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΞΟΠΛΙΣΜΟΣ ΠΟΥ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΕΙΤΑΙ ΣΤΗΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ	11
3.1 ΣΠΑΣΤΗΡΕΣ/ΘΡΑΥΣΤΗΡΕΣ	11
3.1.1 Θραυστήρες με σιαγόνα	11
3.1.2 Περιστροφικοί ή κωνικοί θραυστήρες.....	12
3.1.3 Θραυστήρες με ράουλα	12
3.1.4 Θραυστήρες με σφυριά	14
3.2 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΙΚΗ ΚΑΜΙΝΟΣ	14
3.3 ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΤΗΡΕΣ	16
3.3.1 Προθερμαντήρας με εσχάρα.....	16
3.3.2 Προθερμαντήρας με αιώρηση σωματιδίων	16
3.4 ΠΡΟΑΣΒΕΣΤΟΠΟΙΗΤΗΣ	17
3.5 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΨΥΞΗΣ.....	18
3.5.1 Ψύκτες με εσχάρα	19
3.5.2 Περιστροφικός ή πλανητικός ψύκτης	20
3.6 ΜΥΛΟΙ ΑΛΕΣΗΣ.....	21
3.6.1 Σφαιρόμυλοι.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ - ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΓΚΗ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΟΥΣ.....	24
4.1 ΑΕΡΙΟΙ ΡΥΠΟΙ ΤΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ	24
4.1.1 Οξείδια του αζώτου	24
4.1.2 Διοξείδιο του θείου.....	25
4.1.3 Σκόνη.....	26
4.1.4 Ενώσεις χλωρίου και φθορίου	27
4.1.5 Πτητικές οργανικές ενώσεις, μονοξείδιο του άνθρακα και αμμωνία	28

4.1.6 Πολυχλωρικές διβενζοδιοξίνες και διβενζοφουράνια	29
4.1.7 Μέταλλα.....	29
4.2 ΑΕΡΙΟΙ ΡΥΠΟΙ - ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΚΑΙ ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ	30
4.2.1 Οξείδια του αζώτου	30
4.2.2 Οξείδια του θείου	30
4.2.3 Διοξείδιο του άνθρακα.....	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ	36
5.1 ΕΠΙΚΙΝΔΥΝΕΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ.....	37
5.1.1 Χλώριο.....	37
5.1.2 Βαρέα μέταλλα.....	37
5.1.3 Διοξίνες και φουράνια	38
5.2 ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ	38
5.2.1 Επικίνδυνοι χρησιμοποιημένοι διαλύτες	39
5.2.2 Βιομηχανικά έλαια και απόβλητα πετρελαίου	40
5.2.3 Υδατικά λύματα	42
5.2.4 Ελαστικά από ρόδες και άλλες πηγές	44
5.2.5 Βιομηχανική λάσπη.....	45
5.2.6 Μη επιβλαβή βιομηχανικά απόβλητα	47
5.2.7 Δημοτικά στερεά απόβλητα	49
5.2.8 Δημοτική ιλύς υπονόμων	51
5.2.9 Μπάζα κατασκευών και κατεδαφίσεων	52
5.2.10 Βιομάζα και πράσινα απόβλητα	54
5.2.11 Ζωικά άλευρα.....	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΒΕΛΤΙΣΤΕΣ ΔΙΑΘΕΣΙΜΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΞΟΙΚΟΝΟΜΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	58
6.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	59
6.1.1 Προγράμματα διαχείρισης ενέργειας.....	59
6.1.2 Συστήματα ελέγχου ενέργειας	60
6.2 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΡΩΤΩΝ ΥΛΩΝ.....	60
6.2.1 Αποδοτικά συστήματα μεταφοράς.....	60
6.2.2 Συστήματα ανάδευσης και ομογενοποίησης πρώτων υλών	60
6.2.3 Ανάδευση και ομογενοποίηση τσιμεντολάσπης.....	61
6.2.4 Μύλοι πλύσεως με διαχωριστή κλειστού κυκλώματος	61
6.2.5 Χρήση μύλων με ράουλα στην καύση επί ξηρού.....	61
6.2.6 Επεξεργασία φαρίνας κατά την καύση επί ξηρού – οριζόντιοι μύλοι.....	61
6.2.7 Διαχωριστές υψηλής απόδοσης.....	62
6.3 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	62
6.3.1 Πρέσα ραούλων για άλεση γαιάνθρακα.....	62
6.4 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΛΙΝΚΕΡ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΥΣΗΣ ΕΠΙ ΞΗΡΟΥ	63
6.4.1 Διαδικασίες διαχείρισης συστημάτων ελέγχου.....	63
6.4.2 Βελτιώσεις στα συστήματα ανάφλεξης καμίνου	64
6.4.3 Έμμεση Ανάφλεξη.....	64
6.4.4 Εμπλουτισμός σε οξυγόνο.....	65
6.4.5 Σφραγίσεις	65
6.4.6 Μείωση απωλειών θερμότητας από το κέλυφος της καμίνου.....	66
6.4.7 Πυρίμαχα υλικά.....	66
6.4.8 Οδηγοί υψικαμίνου	66
6.4.9 Ανεμιστήρες ρυθμιζόμενης ταχύτητας	66
6.4.10 Μετατροπή σε παλινδρομικό ψύκτη εσχάρας	67

6.5 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΛΙΝΚΕΡ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΥΣΗΣ ΕΠΙ ΥΓΡΟΥ	67
6.5.1 Αφυγραντήρας τσιμεντολάσσης.....	67
6.5.2 Συστήματα διήθησης	68
6.5.3 Συστήματα προθερμαντήρα και προασβεστοποιητή	68
6.6 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΚΛΙΝΚΕΡ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΕΠΙ ΞΗΡΟΥ – ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΜΙΝΟΥ ΜΕ ΠΡΟΘΕΡΜΑΝΣΗ	68
6.6.1 Κυκλωνικά συστήματα αιώρησης σωματιδίων χαμηλής πτώσης πίεσης	68
6.6.2 Συμπαραγωγή.....	69
6.6.3 Μετατροπή σε πολυβάθμιο προθερμαντήρα καμίνου.....	69
6.7 ΤΕΛΙΚΗ ΑΛΕΣΗ	69
6.7.1 Έλεγχος διαδικασίας άλεσης.....	69
6.7.2 Προχωρημένες τεχνικές άλεσης	70
6.7.3 Υψηλής απόδοσης διαχωριστές.....	70
6.7.4 Βελτιωμένα Μέσα άλεσης.....	71
6.8 ΜΕΤΡΑ ΣΤΟ ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΟΥ ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΟΥ (PLANT-WIDE MEASURES)	71
6.8.1 Προληπτική συντήρηση.....	71
6.8.2 Κινητήρια συστήματα	71
6.8.3 Στρατηγική επιλογή κινητήρα.....	72
6.8.4 Συντήρηση	72
6.8.5 Κατάλληλο μέγεθος κινητήρα	72
6.8.6 Οδηγοί ρύθμισης ταχύτητας	73
6.8.7 Συντελεστής διόρθωσης ισχύος.....	73
6.8.8 Συστήματα αέρα συμπίεσης.....	73
6.8.9 Συντήρηση συστημάτων συμπιεσμένου αέρα.....	73
6.8.10 Μείωση διαρροών	74
6.8.11 Μείωση στη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής.....	74
6.8.12 Μεγιστοποίηση επιτρεπόμενου σημείου δρόσου ή υγροποίησης στον αέρα εισαγωγής.....	75
6.8.13 Έλεγχος συμπίεσής.....	75
6.8.14 Σωστή διάμετρος σωλήνα	75
6.8.15 Ανάκτηση θερμότητας για προθερμανσμένο νερό.....	76
6.9 ΦΩΤΙΣΜΟΣ.....	76
6.10 ΑΛΛΑΓΕΣ ΣΤΟ ΠΡΟΪΟΝ ΚΑΙ ΣΤΙΣ ΠΡΩΤΕΣ ΥΛΕΣ	77
6.10.1 Περιεχόμενο αλκαλίων	77
6.10.2 Ανάμεικτο τσιμέντο.....	77
6.10.3 Ασβεστολιθικό τσιμέντο πόρτλαντ	78
6.10.4 Μείωση της λεπτότητας για ιδιαίτερη χρήση.....	78
6.11 ΕΞΕΛΙΓΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ	78
6.11.1 Fluidized bed kiln.....	78
6.11.2 Εξελιγμένες τεχνολογίες λειοτρίβησης	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΝΟΨΗ	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΑΝΑΦΟΡΕΣ	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	81
ΔΙΑΔΙΚΤΥΑΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ	92

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Το τσιμέντο αποτελεί το κύριο υλικό κατασκευής τόσο στη στέγαση όσο και στα έργα υποδομής. Η τσιμεντοβιομηχανία είναι ένας τομέας που αντιμετωπίζει αυξανόμενες προκλήσεις που σχετίζονται με τη διατήρηση των αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων, όπως ο γαιάνθρακας, καθώς και των αποθεμάτων πρώτων υλών. Ταυτόχρονα, καλείται να συμμορφωθεί στα όλο και πιο αυστηρά περιβαλλοντικά πρότυπα, μειώνοντας τις αέριες εκπομπές ρύπων και κυρίως του CO₂. Προκειμένου να επιτευχθούν οι παραπάνω στόχοι, που παράλληλα αποτελούν και περιορισμούς, η τσιμεντοβιομηχανία μάχεται για την εύρεση νέων ενεργειακά αποδοτικότερων μεθόδων και την εφαρμογή των ήδη υπαρχόντων, με βασική προϋπόθεση τη διατήρηση της ποιότητας του τελικού προϊόντος.

Η ανάγκη για εύρεση τέτοιων μεθόδων γίνεται άκρως επιτακτική, καθώς η διαδικασία παραγωγής τσιμέντου απαιτεί μεγάλα ποσά ενέργειας. Έτσι, έστω και μία μικρή αύξηση της ενεργειακής απόδοσης της διαδικασίας θα οδηγήσει σε σημαντικά ποσά εξοικονόμησης ενέργειας. Παρά το γεγονός ότι έχουν γίνει αρκετές βελτιώσεις προς αυτή την κατεύθυνση υπάρχουν ακόμη μεγάλα περιθώρια εξέλιξης.

Μία σημαντική παράμετρος που μπορεί να επιτελέσει σε αυτό είναι η σωστή αξιοποίηση των εναλλακτικών καυσίμων, όπως τα ελαστικά. Τα εναλλακτικά καύσιμα βοηθούν στη διατήρηση των αποθεμάτων των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ωστόσο, η αλόγιστη και απερίσκεπτη χρήση τους μπορεί να επηρεάσει αρνητικά το περιβάλλον και το οικοσύστημα. Συνεπώς, είναι απαραίτητη η έρευνα πριν τη χρήση προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν οι επιπτώσεις. Παραθέτουμε αντίστοιχο κεφάλαιο που αποσκοπεί στον προβληματισμό του αναγνώστη.

Εξίσου σημαντική παράμετρος είναι η βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης του μηχανολογικού εξοπλισμού μέσω συνεχούς ελέγχου και συντήρησης ή ακόμη και η ενημέρωση του προσωπικού, που αποτελούν κάποιες από τις Βέλτιστες Διαθέσιμες Τεχνικές Εξοικονόμησης Ενέργειας (Best Available Techniques).

Κεφάλαιο 2: Παραγωγή τσιμέντου

2.1 Πρώτες ύλες για την παραγωγή τσιμέντου

Όπως είναι γνωστό, το τσιμέντο είναι ένα υδραυλικό συνδετικό υλικό και βασικό συστατικό των σκυροδεμάτων και των κονιαμάτων. Διάφορα συστατικά χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες για την παραγωγή του τσιμέντου, έτσι ώστε το τελικό προϊόν να έχει την κατάλληλη χημική σύσταση. Αυτά τα συστατικά αλέθονται σε μικρού μεγέθους σωματίδια για να αναμειγνύονται και να αντιδρούν ευκολότερα. Το τελικό μίγμα τροφοδοτείται στην περιστροφική κάμινο (rotary kiln), στην οποία επικρατούν υψηλές συνθήκες θερμοκρασίας. Οι υψηλές αυτές θερμοκρασίες μπορούν να μεταβάλουν την επιθυμητή σύσταση (που έχει προσδιοριστεί αρχικά από τον κατασκευαστή) των αρχικών συστατικών, καθώς καίγονται και ένα μέρος τους αντικαθίσταται από οξυγόνο που παρέχεται από τον αέρα.

Τα κύρια στοιχεία που πρέπει να περιέχονται στις πρώτες ύλες είναι το ασβέστιο (Ca), πυρίτιο (Si), αλουμίνιο (Al), σίδηρος (Fe) τα οποία με τη σειρά τους θα αντιδράσουν κατάλληλα, έπειτα από κάποιες διεργασίες όπως είναι το σπάσιμο (crushing), το άλεσμα (milling), και η κατάλληλη αναλογία (proportioning) προς τα αντίστοιχα οξείδια. Οι πρώτες ύλες από τις οποίες προέρχονται αυτά τα στοιχεία παρουσιάζονται στον Πίνακα 2-1.

Πίνακας 2-1: Raw ingredients used to provide each of the main cement elements [1]

Calcium	Silicon	Aluminum	Iron
Limestone	Clay	Clay	Clay
Marl	Marl	Shale	Iron ore
Calcite	Sand	Fly ash	Mill scale
Aragonite	Shale	Aluminun	Shale
Shale	Fly Ash		blast furnace dust
Sea Shells	Rice hull ash		
Cement kiln dust	Slag		

Οι λόγοι για τους οποίους χρειαζόμαστε τα παραπάνω συστατικά-οξείδια, είναι [2]

1. CaO (γνωστό και ως ασβεστος-lime):
 - η παρουσία του σε επαρκή ποσότητα είναι απαραίτητη για το σχηματισμό πυριτικών (silicates) και αργλικών (aluminates) αλάτων του ασβεστίου,
 - σε περίπτωση ελλείματος μειώνεται η αντοχή του τσιμέντου και επιβραδύνεται ο σχηματισμός του,
 - υπέρβαση στην ποσότητά του οδηγεί στη δημιουργία επισφαλούς τσιμέντου, κάνοντάς το να διογκώνεται και να αποσυντίθεται,
2. SiO_2 (γνωστό και ως πυριτία - silica):
 - επαρκής ποσότητα θα πρέπει να εξασφαλίζεται για το σχηματισμό Ca_2SiO_5 (Belite) και Ca_3SiO_4 (Alite),
 - παρέχει αντοχή στο τσιμέντο,

- το 30% του τελικού προϊόντος τσιμέντου είναι Silica,
3. Al_2O_3 (αλουμίνα):
 - παρέχει γρήγορα τις ρυθμιστικές ιδιότητες στο τσιμέντο,
 - μειώνει τη θερμοκρασία σχηματισμού κλίνκερ,
 - όταν η ποσότητά της υπερβαίνει κάποιο μέτρο αποδυναμώνει το τσιμέντο,
 4. Fe_2O_3 (οξειδία του σιδήρου - iron oxide):
 - παρέχει χρώμα στο τσιμέντο,
 - σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες βοηθά στο σχηματισμό $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ (tetracalcium aluminate) [3]:
 - βοηθά στην παραγωγή του τσιμέντου τύπου Portland επιτρέποντας χαμηλότερη θερμοκρασία σχηματισμού του κλίνκερ,
 - δρα ως πληρωτικό υλικό, συνεισφέρει πολύ λίγο στην αντοχή παρά το γεγονός ότι ενυδατώνεται πολύ γρήγορα,
 - είναι υπεύθυνο για το γκρι χρώμα του τσιμέντου Portland,
 - προσδίδει σκληρότητα και δύναμη.

Πέρα των προαναφερθέντων σημαντική είναι η ύπαρξη των οξειδίου του μαγνησίου (MgO), τριοξειδίου του θείου (SO_3), αλκαλίων και θειικού ασβεστίου (CaSO_4).

5. MgO (Magnesia):
 - δεν πρέπει να υπάρχει σε σύσταση μεγαλύτερης της τάξης του 2%,
 - παραπάνω ποσότητα μειώνει την αντοχή (strength) του τσιμέντου,
6. SO_3 (Sulfur trioxide):
 - δεν πρέπει να υπάρχει σε σύσταση μεγαλύτερης της τάξης του 2%,
 - παραπάνω ποσότητα από την απαιτούμενη κάνει το τσιμέντο να είναι επισφαλές (unsound),
7. K_2O και Na_2O (αλκάλια - alkalines ή alkalies):
 - δεν πρέπει να υπάρχουν σε σύσταση μεγαλύτερης της τάξης του 1%,
 - παραπάνω ποσότητα της απαιτούμενης προκαλεί εξάνθηση (efflorescence), δηλαδή άσπρα σημάδια στην επιφάνεια του τσιμέντου που έχουν επίπτωση μόνο εμφανισιακά [4],
8. CaSO_4 (calcium sulfate):
 - παρουσιάζεται στο τσιμέντο με τη μορφή γύψου ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$),
 - επιβραδύνει τη ρυθμιστική αντίδραση του τσιμέντου,
 - ενδεικτική σύσταση 0,1-0,5%.

Η σύσταση του τσιμέντου είναι κατά κόρον σταθερή και παρουσιάζεται στον Πίνακα 2-2. Ελάχιστες αποκλίσεις μπορεί να υπάρξουν από τις ενδεικτικές τιμές του πίνακα, της τάξης του 1-2%. Σημειώνεται ότι ο πίνακας αυτός ισχύει για το τσιμέντο Portland, που είναι το πλέον σύννηθες (>90% του παραγόμενου τσιμέντου) κατασκευαστικό μέσο.

Πολλές φορές συναντάμε τα παραπάνω συστατικά του τσιμέντου, και έπειτα του κλίνκερ, με τους χημικούς τους τύπους ή με τη συντομογραφία αυτών, όπως ακριβώς έχει θεσπιστεί από τη Cement Chemist Notation (CCN). Για το λόγο αυτό η συντομογραφία των πρώτων υλών παρατίθεται στον Πίνακα 2-3. Επίσης, στον Πίνακα 2-4 δίνεται μια τυπική σύσταση για το κλίνκερ.

Πίνακας 2-2: Πρώτες ύλες για την Παρασκευή του τσιμέντου Portland [5]

Compound	Percentage in cement
Lime	60-65
Silica	17-25
Alumina	3-8
Magnesia	1-3
Iron oxide	0.5-6

Πίνακας 2-3: Συντομογραφίες των πρώτων υλών του τσιμέντου [6]

Compound	Formula	Shorthand form
Calcium oxide(lime)	CaO	C
Silicon oxide(silica)	SiO ₂	S
Aluminum oxide(alumina)	Al ₂ O ₃	A
Iron oxide	Fe ₂ O ₃	F
Water	H ₂ O	H
Sulfate	SO ₃	S
Tricalcium aluminate	Ca ₃ Al ₂ O ₆	C ₃ A
Tetracalcium aluminoferrite	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀	C ₄ AF
Belite(dicalcium silicate)	Ca ₂ SiO ₅	C ₂ S
Alite(tricalcium silicate)	Ca ₃ SiO ₄	C ₃ S
Sodium oxide	Na ₂ O	N
Potassium oxide	K ₂ O	K
gypsum	CaSO ₄ .2H ₂ O	C \underline{S} H ₂

Πίνακας 2-4: Τυπική σύσταση του κλίνκερ κατά Mindess and Young [7]

Compound	Formula	Shorthand form	% by weight
Tricalcium aluminate	Ca ₃ Al ₂ O ₆	C ₃ A	10
Tetracalcium aluminoferrite	Ca ₄ Al ₂ Fe ₂ O ₁₀	C ₄ AF	8
Belite(dicalcium silicate)	Ca ₂ SiO ₅	C ₂ S	20
Alite(tricalcium silicate)	Ca ₃ SiO ₄	C ₃ S	55
Sodium oxide	Na ₂ O	N	<2
Potassium oxide	K ₂ O	K	<2
gypsum	CaSO ₄ .2H ₂ O	C \underline{S} H ₂	5

2.2 Στάδια παραγωγικής διαδικασίας

2.2.1 Πρώτο στάδιο - Εξόρυξη των πρώτων υλών

Το πρώτο στάδιο περιλαμβάνει την εξόρυξη των πρώτων υλών (mining). Οι βασικές πρώτες ύλες για τη δημιουργία τσιμέντου παρέχονται από φυσικές πηγές και είναι ο ασβεστόλιθος (lime), η κιμωλία (κρητίδα - chalk) και η άργιλος (clay) [8]. Από τον ασβεστόλιθο προέρχεται το μεγαλύτερο μέρος του

απαραίτητου ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3), ενώ η άργιλος, ο σχιστόλιθος (shale), η χαλαζιακή άμμος (quartz) και άλλα υλικά παρέχουν το πυρίτιο (Si). Επίσης χρησιμοποιούνται οξείδια αλουμινίου (Al_2O_3) και σιδήρου (Fe_2O_3), τα οποία είναι απαραίτητα για την παραγωγή τσιμέντου Portland.

Ο ασβεστόλιθος συνήθως εξορύσσεται από γειτονικά λατομεία ή από υπόγειες πηγές [9]. Συνήθεις τεχνικές είναι η γεώτρηση, η χρήση ισχυρών εκσκαπτικών μηχανημάτων και σε πολλές περιπτώσεις εκρηκτικών.

Σημειώνεται ότι εναλλακτικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν και παραπροϊόντα της παραγωγικής διαδικασίας ως μέρος των πρώτων υλών, όπως η στάχτη (ash), η σκωρία κλιβάνου (slag) και άλλα, εφόσον έχουν την κατάλληλη χημική σύσταση.

Για την παραγωγή ενός τόνου τσιμέντου χρειάζονται περίπου 1,57 τόνοι πρώτων υλών [10].

2.2.2 Δεύτερο στάδιο - Θραύση και άλεση των πρώτων υλών

Η καλή ποιότητα του τσιμέντου και η μη διακοπτόμενη λειτουργία της καμίνου εξαρτώνται άμεσα από τη χημική σύσταση του τροφοδοτικού υλικού του φούρνου-φαρίνα (feed). Η χημική σύσταση εξαρτάται από τη σύσταση κατά βάρος των πρώτων υλών, όσο αφορά τα διάφορα συστατικά που τις αποτελούν. Για αυτό γίνεται προσεκτική μέτρηση και επιλογή των συστατικών που τελικά θα αλεστούν (grinding). Για να γίνει το μείγμα ομοιογενές θα πρέπει να μειώσουμε το πάχος των πρώτων υλών σε πρώτο στάδιο σπάζοντας (crushing) τα πετρώματα με τους θραυστήρες (crushers), όπως είναι οι θραυστήρες με σιαγόνα (jaw crushers) και οι περιστροφικοί θραυστήρες (gyratory crushers), και σε δεύτερο στάδιο αλέθοντάς τα με τους αλεστήρες (grinders), όπως είναι τα ράουλα (roller) και οι σφυρόμυλοι (hammermills). Οι μεγαλύτερες πέτρες που δεν κατάφεραν να αλεστούν, κοσκινίζονται και επιστρέφουν στην αρχή της διαδικασίας.

Για τα συστήματα κλιβάνων ξηρής διεργασίας (dry process) και ημιξηρής διεργασίας (semidry process), που αποτελούν την συντριπτική πλειοψηφία στη σύγχρονη τσιμεντοβιομηχανία και θα συζητηθούν παρακάτω, οι πρώτες ύλες αλέθονται μέχρι να γίνουν λεπτή σκόνη χωρίς πρόσθετες διαδικασίες. Τα πιο συνηθισμένα συστήματα άλεσης επί ξηρού που χρησιμοποιούνται είναι:

- κυλινδρικός σφαιροφόρος μύλος (tube mill center discharge),
- tube mill (airswept),
- κατακόρυφος κυλινδρόμυλος (vertical roller mill),
- οριζόντιος κυλινδρόμυλος, (horizontal roller mill).

Έχει ήδη αναφερθεί η σημασία της λεπτότητας και του μεγέθους κόκκων του μείγματος που θα εισέλθει στον κλίβανο. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιούνται διατάξεις που ξεχωρίζουν το υλικό που δεν πληροί τις προδιαγραφές.

Τέλος, πολλές φορές απαιτείται να αναμείξουμε το υλικό μας με πρόσθετα υλικά (additives) για να αυξήσουμε την περιεκτικότητα του σε οξείδια πυριτίου και οξείδια σιδήρου. Τέτοια πρόσθετα συνήθως είναι η άμμος χαλαζία και μεταλλεύματα σιδήρου αντιστοίχως [11].

2.2.3 Τρίτο στάδιο – Έψηση και παραγωγή κλίνκερ

Πρόκειται για το πιο ενεργοβόρο στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας τσιμέντου καθώς το 90% της συνολικής ενέργειας καταναλώνεται σε αυτό, όπως και το μεγαλύτερο μέρος των καυσίμων.

Σε αυτό το στάδιο γίνεται η παραγωγή του portland κλίνκερ (clinker production), δηλαδή μικρών, σχεδόν σφαιρικών μαζών (nodules) γκριζοπράσινου χρώματος με μέγεθος που κυμαίνεται από 3 mm μέχρι 25 mm σε διάμετρο. Το κλίνκερ αποτελείται από μία ποικιλία πυριτικών του ασβεστίου (calcium silicates). Τα κυριότερα πυριτικά άλατα είναι το alite (Ca_3SiO_4) και το belite (Ca_2SiO_5). Μεταλλικά στοιχεία όπως το αργιλικό τριασβέστιο - tricalcium aluminate ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$) και το tetracalcium aluminoferrite ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$) είναι επίσης σημαντικά συστατικά και η σημασία τους αναφέρθηκε στο υποκεφάλαιο «2.1 - Πρώτες ύλες για την παραγωγή τσιμέντου». Αυτά τα στοιχεία συχνά δημιουργούνται θερμαίνοντας πρώτες ύλες όπως αργιλικά πετρώματα (clay) και ασβεστόλιθος (limestone).

Το κλίνκερ (Εικόνα 2-1) σχηματίζεται σε περιστροφικούς κλιβάνους με πυρο-επεξεργασία (pyroprocessing rotary kilns ή cement kilns) μέσω τριών διεργασιών (wet, semi-dry/wet, dry process), ανάλογα με το ποσοστό υγρασίας που περιέχει το μίγμα πρώτων υλών ή «φαρίνα» (raw meal) που εισέρχεται στην κάμινο. Στο σύστημα του κλιβάνου επιτελούνται τα παρακάτω [12]¹:

- εξατμίζεται το ενυπάρχον νερό στο ομογενές μείγμα των πρώτων υλών,
- ασβεστοποιούνται τα συστατικά των ανθρακικών αλάτων (calcination),
- σχηματίζονται τα μεταλλικά στοιχεία του τσιμέντου (clinkerization).

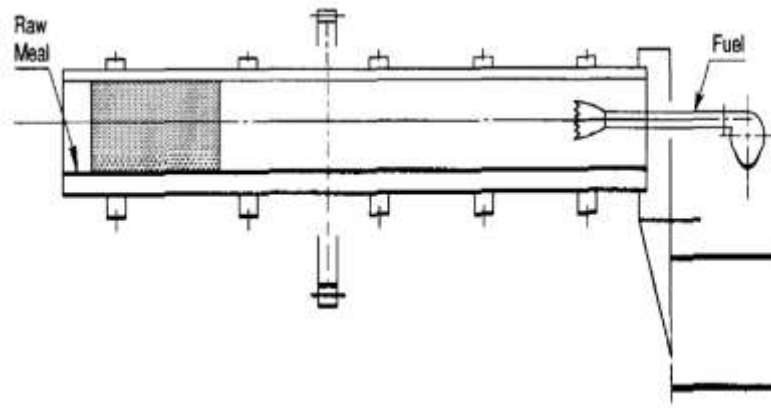


Εικόνα 2-1: Κλίνκερ [13]

2.2.3.1 Υγρή διεργασία

Κατά την υγρή διεργασία (wet process) η φαρίνα φτάνει στην περιστροφική κάμινο με περιεχόμενο υγρασίας 40-45% [14]. Το νερό, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας της φαρίνας σε υγρασία, πρέπει πρώτα να εξατμιστεί στην κάμινο σε ζώνη χαμηλής θερμοκρασίας. Προκειμένου να επιτευχθεί η εξάτμιση απαιτείται κάμινος μεγάλου μήκους με λόγο μήκους/διαμέτρου=38. Τα μήκη φτάνουν, και πολλές φορές ξεπερνάνε, τα 230 μέτρα [15]. Απεικόνιση της διεργασίας παρουσιάζεται στην Εικόνα 2-2.

¹ Η αναλυτικότερη περιγραφή των διεργασιών καθώς και οι χημικές ενώσεις γίνεται σε αντίστοιχο παράρτημα.



Εικόνα 2-2: Η υγρή διεργασία παραγωγής τσιμέντου [16]

2.2.3.2 Ξηρή διεργασία

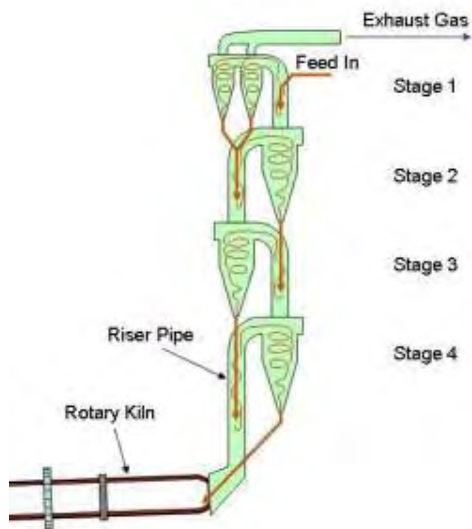
Κατά την ξηρή διεργασία (Dry process), η φαρίνα φτάνει με ποσοστό υγρασίας 0,5% περίπου και γι' αυτό κάμινοι με μεγάλο μήκος δεν είναι απαραίτητοι, λόγω της μειωμένης ανάγκης για εξάτμιση. Ενώ παλαιότερα χρησιμοποιούνταν μεγάλοι μήκους κάμινοι χωρίς προηγούμενα στάδια προθέρμανσης [17] σήμερα το στάδιο προθέρμανσης (συστοιχία 4 συνήθως κυκλωνικών διαχωριστών) δεν παραλείπεται προσδίδοντας στη φαρίνα μια σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας της μέχρι τους 900°C (ασβεστοποίηση), πριν την εισαγωγή της στον κλίβανο. Για καλύτερη κατανόηση παρατίθενται οι Εικόνες 2-3 με 2-5.

2.2.3.3 Ημι-ξηρή/υγρή διεργασία

Οι διαδικασίες για ενεργειακά αποδοτικές καμίνους πραγματοποιήθηκαν από τον Otto Lelopp μέσω της χρήσης semi-dry/wet καμίνων με το όνομα Lelop. Η φαρίνα φτάνει στην συγκεκριμένη κάμινο με ποσοστό υγρασίας 11-14% στην περίπτωση ημι-ξηρής και 17-20% στην περίπτωση της ημι-υγρής.

Στη διεργασία της ημι-ξηρής επεξεργασίας, η «ξηρή» φαρίνα πελλετοποιείται με νερό και τροφοδοτείται σε προθερμαντήρα εσχάρα (grate preheater) πριν την κάμινο.

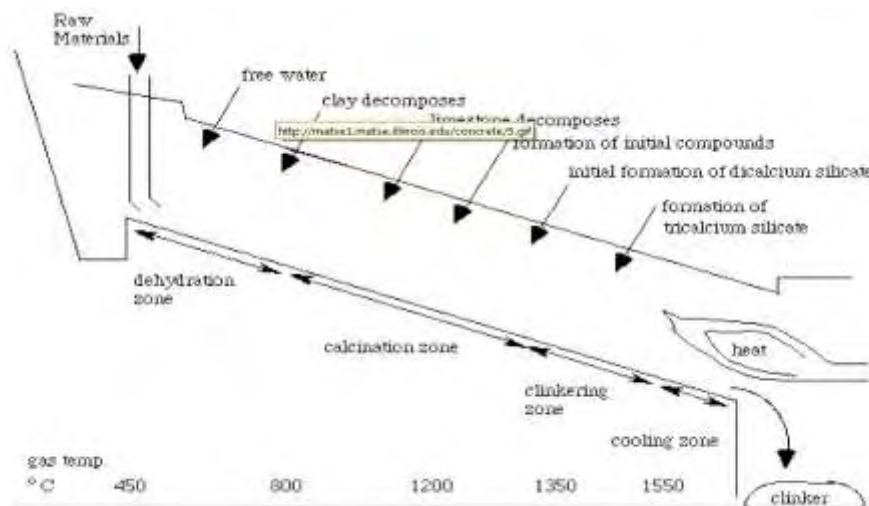
Στη διεργασία της ημι-υγρής επεξεργασίας, η τσιμεντολάσπη (slurry) αφυγραίνεται σε πρεσσόφιλτρο (filter presses). Το ιζηματογενές προκύπτων υλικό της διήθησης (filter cake) εκβάλλεται και πελλετοποιείται, και στη συνέχεια τροφοδοτείται είτε σε προθερμαντήρα με



Εικόνα 2-3: Συστοιχία προθερμαντήρων 4 σταδίων [18]

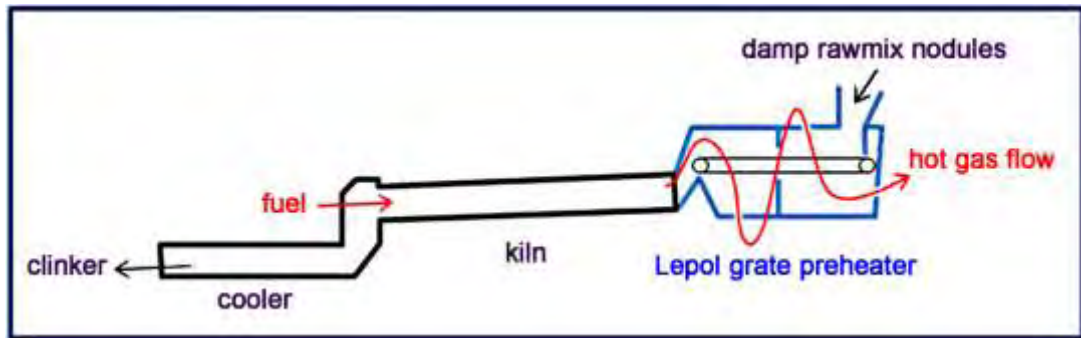


Εικόνα 2-4: Πύργος με συστοιχία προθερμαντήρων 4 σταδίων, σιλό αποθήκευσης πρώτων υλών και αεραγωγός εξαγωγής καυσαερίων [19]



Εικόνα 2-5: Διάγραμμα ροής έμφυσης [20]

εσχάρα, είτε απευθείας στον ξηραντήρα για την παραγωγή φαρίνας. Παρατίθεται η Εικόνα 2-6 για την πληρέστερη κατανόηση της καμίνου Lelop.



Εικόνα 2-6: Lepol kiln layout [21]

Αφού σχηματιστεί το κλίνκερ ψύχεται αμέσως για να μειωθεί ο σχηματισμός της κρυσταλλικής φάσης και να σχηματιστεί το Ca_3SiO_4 (alite), σημαντικό συστατικό που προσδίδει σκληρότητα στο τσιμέντο. Τα κύρια συστήματα ψύξης είναι η εσχάρα (grate cooler) και ο πλανητικός ψύκτης αυλών (tube-planetary cooler). Το κλίνκερ ψύχεται με αέρια ρεύματα αντίθετης ροής στο πλανητικό ψύκτη ή με αέρια κάθετης στο σύστημα ψύξης εσχάρας.

Όλες οι διατάξεις θα μελετηθούν αργότερα στο κεφάλαιο «εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στην τσιμεντοβιομηχανία».

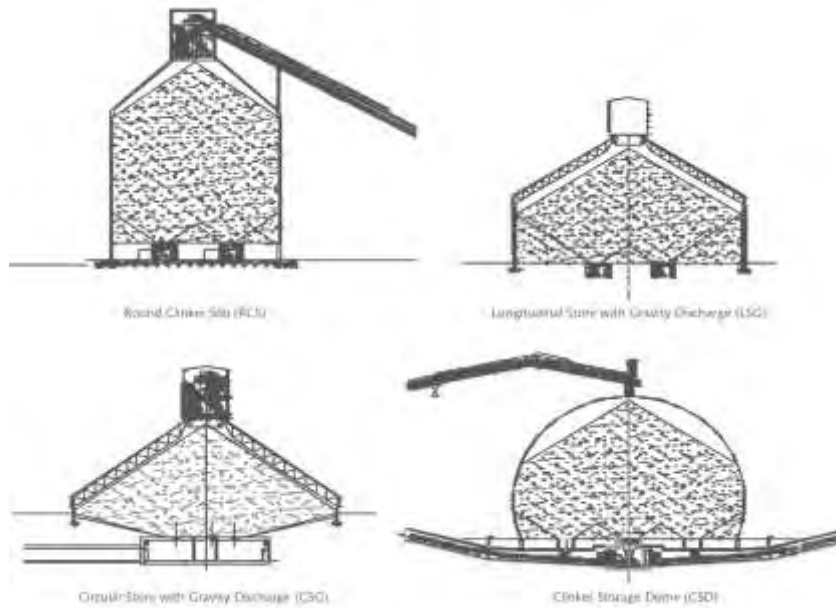
2.2.4 Τέταρτο στάδιο - Τελική άλεση και διανομή

Μετά την παραγωγή του το κλίνκερ ψύχεται και αποθηκεύεται σε σιλό ή άλλες διατάξεις όπως clinker storage domes (CSD), round clinker silos (RCS), circular store with gravity discharge (CSG), longitudinal store with gravity discharge (LSG) για το τελικό άλεσμα (βλέπε Εικόνα 2-7).

Η τελική άλεση γίνεται με την προσθήκη γύψου (3-5% γύψος για τον έλεγχο ρυθμιστικών ιδιοτήτων του τσιμέντου) σε σφαιρόμυλους (ball mills), σφαιρόμυλους σε συνδυασμό με πρέσες τύπου ράουλων (roller presses), σε αλεστήρες με ράουλα (roller mills) ή πρέσες τύπου ράουλων.

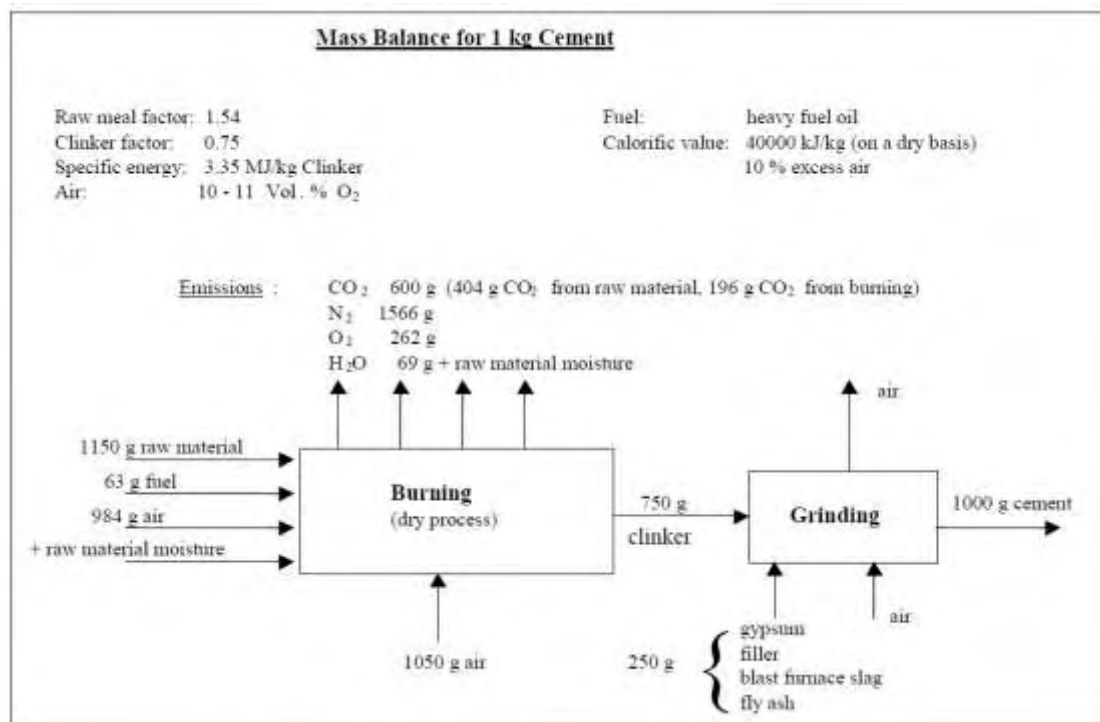
Το κλίνκερ μαζί με το γύψο αλέθονται σε πολύ λεπτή σκόνη (μικρότερο από 90 μm). Σε αυτό το στάδιο μπορούν να προστεθούν μαζί με το γύψο διάφορα άλλα υλικά, τα οποία λέγονται πρόσθετα (additives). Χρησιμοποιώντας τα πρόσθετα σε διάφορες αναλογίες έχουμε συγκεκριμένους τύπους τσιμέντου. Τα χονδρόκοκκα υλικά που βρίσκονται στο τελικό υλικό οδηγούνται πάλι μέσω ενός διαχωριστή στους μύλους άλεσης μέχρι να αποδοθεί στο τελικό προϊόν η κατάλληλη λεπτότητα.

Το τσιμέντο αποθηκεύεται σε σιλό μέχρι να αποσταλεί χύδην ή σακευμένο στους πελάτες με φορτηγά ή πλοία.



Εικόνα 2-7: Διατάξεις αποθήκευσης του κλίνκερ [22]

Στην Εικόνα 2-8 παρατίθεται το ισοζύγιο μάζας για την παραγωγή ενός κιλού τσιμέντου.



Εικόνα 2-8: Ισοζύγιο μάζας για την παραγωγή ενός κιλού τσιμέντου [23]

Κεφάλαιο 3: Εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στην τιμεντοβιομηχανία

Στο κεφάλαιο αυτό παρατίθεται ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται σε μία τιμεντοβιομηχανία και κατά επέκταση η παραγωγική διαδικασία που αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 2.

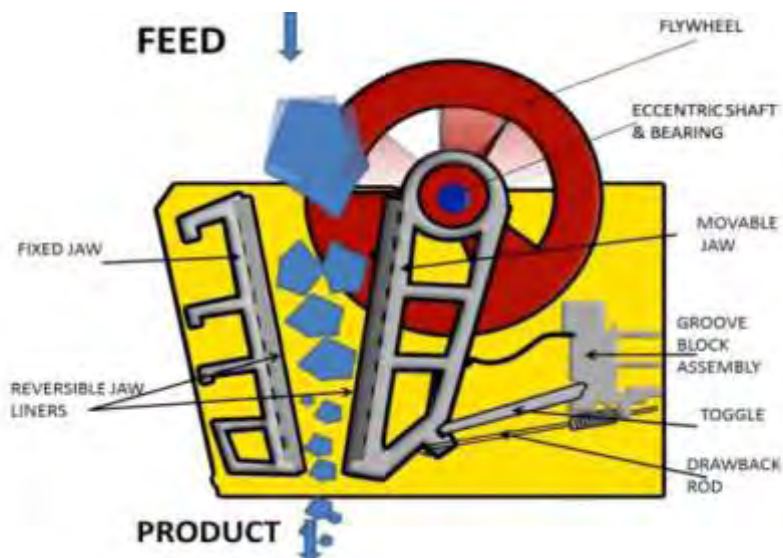
3.1 Σπαστήρες/θραυστήρες

Στο δεύτερο στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας αναφέρθηκε ότι προκειμένου να μειωθεί το μέγεθος των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται (ασβεστόλιθος, κρητίδα, αργιλικά πετρώματα) σε πρώτη φάση χρησιμοποιούνται σπαστήρες ή θραυστήρες (primary reduction). Η μείωση του μεγέθους είναι απαραίτητη προκειμένου να παραχθεί ένα ομογενές μίγμα, το οποίο θα μετατραπεί αργότερα στην κάμινο σε ομογενές κλίνκερ. Οι κατηγορίες των θραυστήρων που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής ανάλογα με τον τρόπο θραύσης.

1. Θραύση με συμπίεση:
 - θραυστήρες με σιαγόνα (jaw crushers),
 - περιστροφικοί ή κωνικοί θραυστήρες (gyratory or cone crushers),
 - θραυστήρες με ράουλα (roller crushers).
2. Θραύση με κρούση:
 - θραυστήρες με σφυριά (hammer crushers).

3.1.1 Θραυστήρες με σιαγόνα

Χρησιμοποιεί θλιπτικές/συμπιεστικές δυνάμεις για το σπάσιμο των σωματιδίων που προσδίδονται σε αυτά μέσω δύο «σιαγόνων». Η μία σιαγόνα είναι σταθερή (fixed jaw), ενώ η άλλη ταλαντώνεται (swing/moving jaw) εκτελώντας συνολικά σύνθετη κίνηση (Εικόνα 3-1). Πιο συγκεκριμένα, η κινούμενη σιαγόνα ακολουθεί ταλάντωση «μπρος-πίσω» αλλά και «πάνω κάτω».



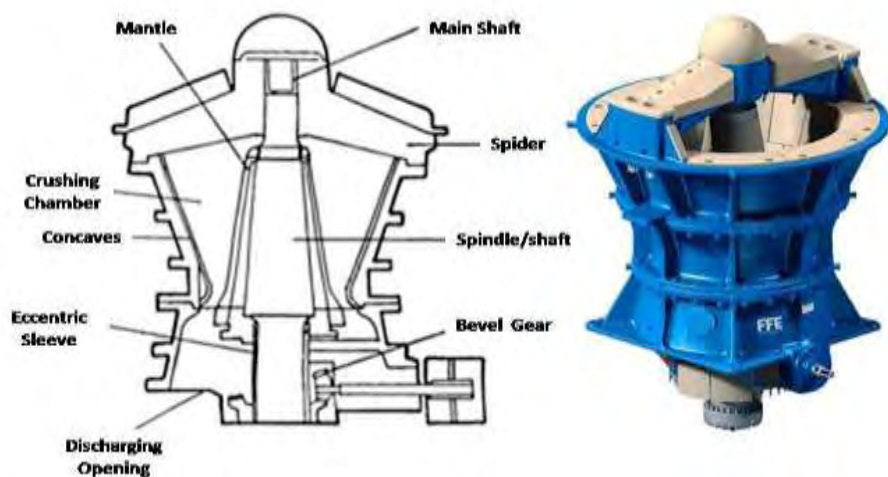
Εικόνα 3-1: Θραυστήρας με σιαγόνα [24]

Βασικά χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν τους θραυστήρες με σιαγόνα είναι η διακοπτόμενη λειτουργία τους, ο λόγος μείωσης του μεγέθους της πρώτης ύλης (feed material reduction ratio) που

αντιστοιχεί σε 6:1 με 8:1, η κατώτερη χωρητικότητα 300t/h και η δυνατότητα θραύσης υλικών πολύ υψηλής σκληρότητας με χαμηλό περιεχόμενο υγρασίας .

3.1.2 Περιστροφικοί ή κωνικοί θραυστήρες

Οι περιστροφικοί θραυστήρες λειτουργούν με την ίδια λογική με τους θραυστήρες με σιαγόνα. Αποτελούνται από μία κοίλη επιφάνεια και μια κωνική κεφαλή (Εικόνα 3-2). Ο εσωτερικός κώνος εκτελεί μια ελαφρώς κυκλική κίνηση αλλά δεν περιστρέφεται. Η κίνηση προσδίδεται από μια διάταξη εκκέντρου. Όπως και στον θραυστήρα με σιαγόνες έτσι και σε αυτή την περίπτωση η πρώτη ύλη κινείται προς τα κάτω μεταξύ του κωνικού διακένου και σταδιακά το μέγεθος μειώνεται μέχρις ότου να γίνει τόσο μικρό όσο καθίσταται απαραίτητο για να πέσει και να συλλεχθεί.

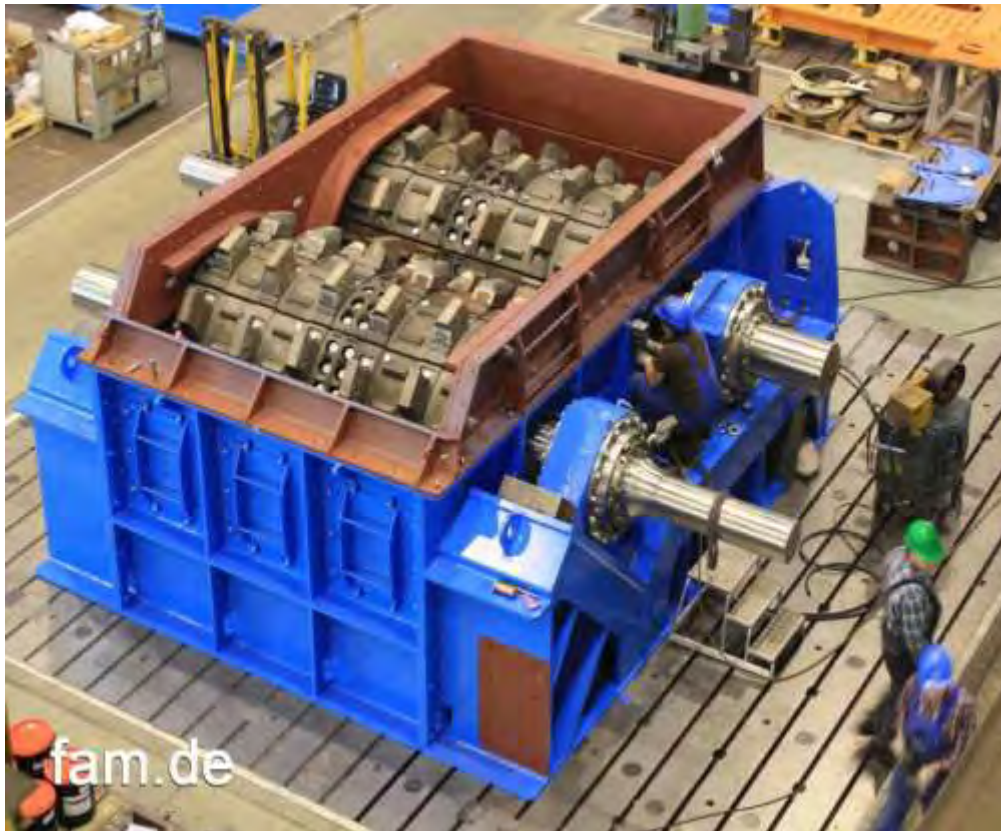


Εικόνα 3-2: Περιστροφικός θραυστήρας [25]

Παρόμοια σχεδόν χαρακτηριστικά με τους θραυστήρες με σιαγόνα παρουσιάζονται και σε αυτή την κατηγορία θραυστήρων. Πιο συγκεκριμένα, αναφέρεται η διακοπτόμενη λειτουργία, ο λόγος μείωσης μεγέθους 12:1 με 15:1, η χωρητικότητα 6000tn/hr και η δυνατότητα θραύσης υλικών υψηλής αντοχής με χαμηλό περιεχόμενο υγρασίας.

3.1.3 Θραυστήρες με ράουλα

Οι θραυστήρες με ράουλα χρησιμοποιούνται για το πρώτο στάδιο μείωσης μεγέθους για υλικά μεσαίας έως υψηλής σκληρότητας και υγρασίας (medium-hard moist and abrasive materials) όπως το μάρμαρο, ο σχιστόλιθος και τα αργιλικά πετρώματα. Το υλικό τροφοδοσίας υποβάλλεται σε συμπίεση και διάτμηση μέσω ενός παράλληλου ζεύγους ραούλων που περιστρέφονται αντίστροφα. Τα ράουλα μπορεί να είναι λεία, με αυλακώσεις, ή με προεξέχοντα τμήματα (για παράδειγμα δόντια), όπως παρουσιάζονται στις Εικόνες 3-3, 3-4 και 3-5.



Εικόνα 3-3: Θραυστήρας με οδοντωτά ράουλα [26]



Εικόνα 3-4: Θραυστήρας με λεία ράουλα [27]



Εικόνα 3-5: Θραυστήρας με αυλακωτά ράουλα [28]

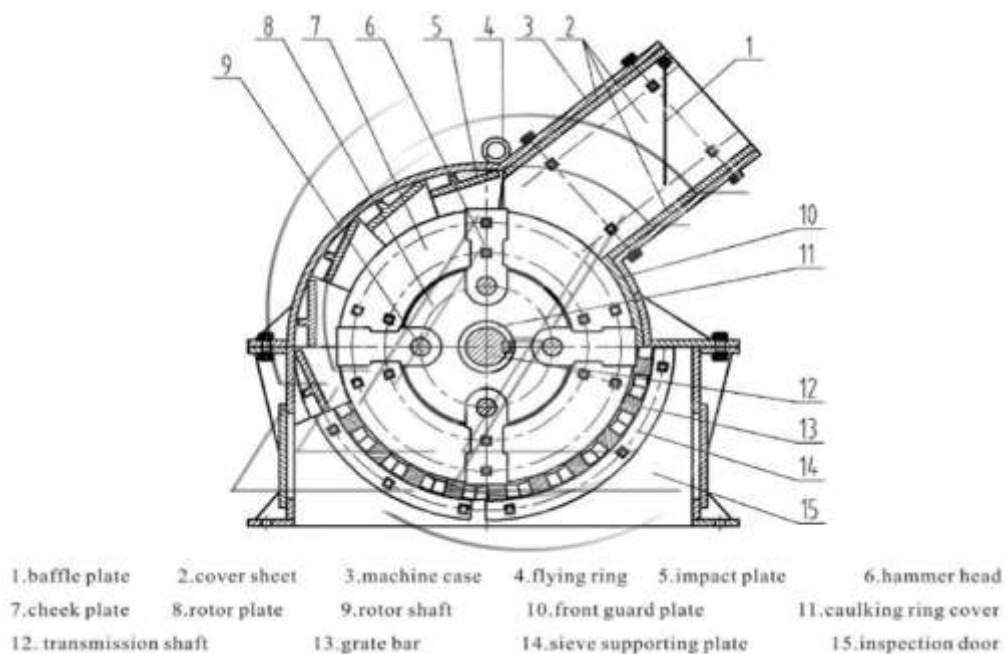
Ο λόγος μείωσης μεγέθους είναι σχετικά χαμηλός με τιμές που κυμαίνονται από 3:1 έως 5:1. Οι περιστροφικές ταχύτητες των ραούλων φτάνουν τα 5-9m/sec.

3.1.4 Θραυστήρες με σφυριά

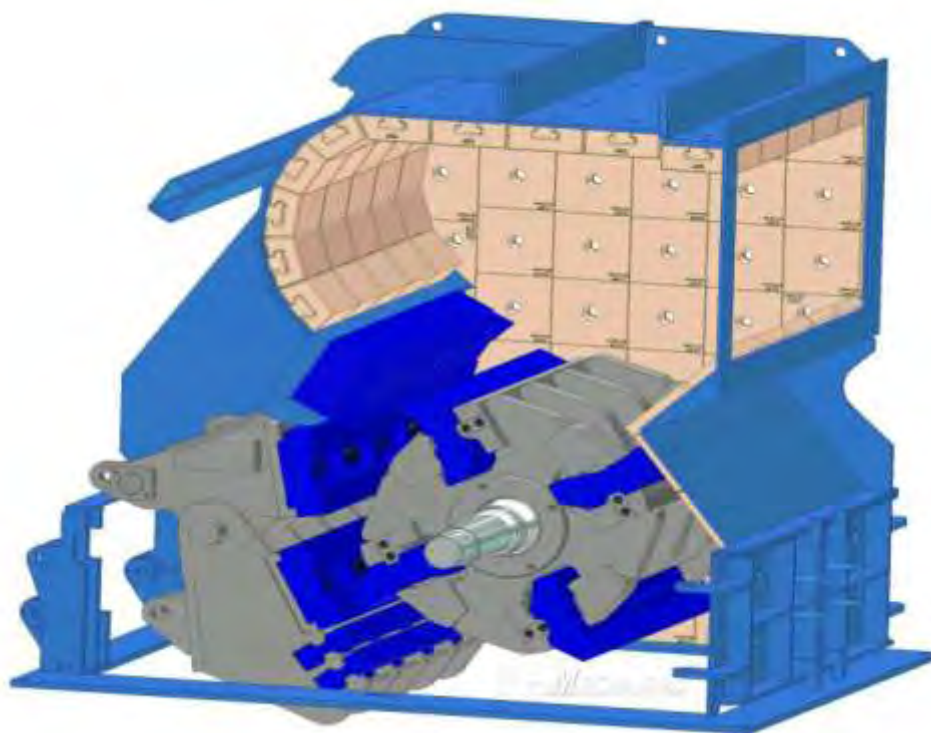
Είναι ο κύριος χρησιμοποιούμενος τύπος θραυστήρα στην τσιμεντοβιομηχανία. Αποτελείται από έναν ρότορα ο οποίος φέρει περιμετρικά σφυριά (Εικόνα 3-7 και 3-8). Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του ρότορα, οι φυγοκεντρικές δυνάμεις αναγκάζουν τα σφυριά να «κοιτάνε» ακτινικά προς τα έξω. Στον πάνω θάλαμο θραύσης η τροφοδοσία υποβάλλεται σε πρόσκρουση με τα σφυριά και την πλάκα σύγκρουσης (impact plate), ενώ ταυτόχρονα τα θραύσματα θλίβονται μεταξύ τους. Περεταίρω μείωση του μεγέθους γίνεται στο διάκενο μεταξύ των σφυριών και της πλάκας σύγκρουσης.

3.2 Περιστροφική κάμινος

Οι περιστροφικές κάμινοι είναι ογκώδεις κυλινδρικού σχήματος κατασκευές, επενδυμένες εσωτερικά με πυρίμαχη επένδυση (πυρίμαχα τούβλα), μέσα στις οποίες τροφοδοτείται ομογενοποιημένο και λειοτριβημένο μείγμα (ασβεστόλιθος, αργιλικά πετρώματα, χαλαζιακά πετρώματα, σιδηρομετάλλευμα, βωξίτης κλπ.) και καύσιμο (άνθρακας, πετρέλαιο ή φυσικό αέριο). Υπάρχουν διάφοροι τύποι περιστροφικών καμίνων, όμως όλες βασίζονται στην ίδια αρχή λειτουργίας. Οι συνήθεις διαστάσεις των περιστροφικών καμίνων είναι: D (διάμετρος) μέχρι 6 m, L (μήκος) μέχρι 180 m. Η ταχύτητα περιστροφής της καμίνου κυμαίνεται από 1-4 στροφές το λεπτό (rpm).



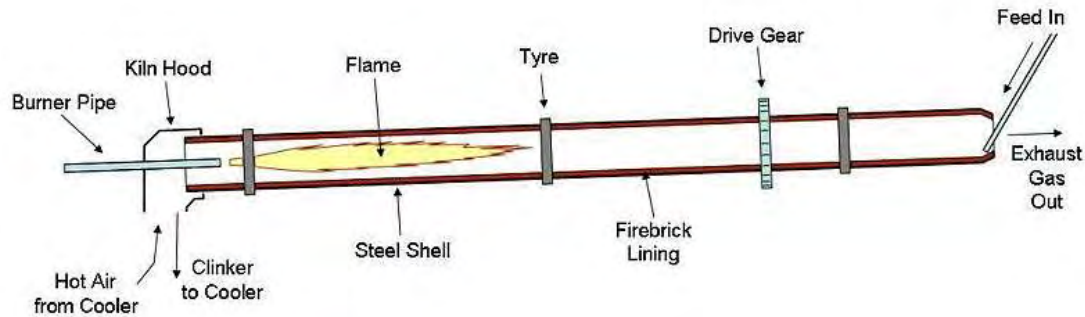
Εικόνα 3-6: Τομή ενός θραυστήρα σφυριών [29]



Εικόνα 3-7: Τομή ενός θραυστήρα σφυριών [30]

Η περιστροφική κάμινος είναι ελαφρώς κεκλιμένη προς την έξοδό της ($1-4^\circ$), για να ρέει το υλικό και να απομακρύνεται από το κατώτερο άκρο το προϊόν της, το κλίνкер (Εικόνα 3-8). Ο χρόνος

παραμονής του υλικού μέσα στην κάμινο μπορεί να φτάσει, ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής, μέχρι 2 ώρες. Οι σύγχρονες μέθοδοι έχουν περιορίσει το χρόνο στα όρια 25-45 min.



Εικόνα 3-8: Περιστροφική κάμινος [31]

3.3 Προθερμαντήρες

Οι προθερμαντήρες (Preheaters) χρησιμοποιούνται για εξοικονόμηση καυσίμου [32] και βρίσκουν ευρεία εφαρμογή στις καμίνους της τσιμεντοβιομηχανίας. Οι κυριότεροι τύποι είναι:

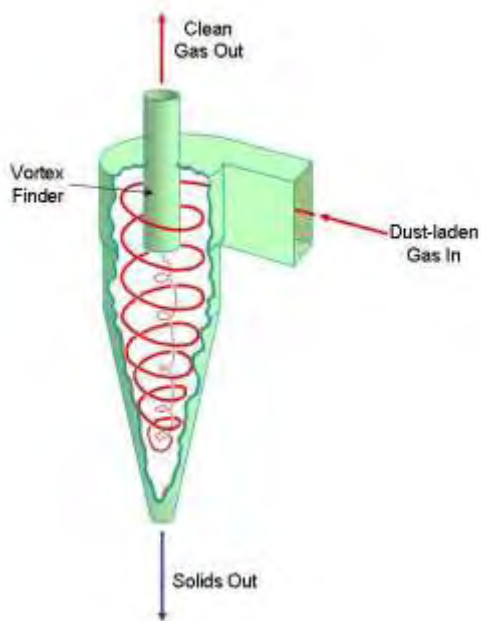
- προθερμαντήρας με εσχάρα (grate preheater),
- προθερμαντήρας με αιώρηση των σωματιδίων (gas-suspension preheater).

3.3.1 Προθερμαντήρας με εσχάρα

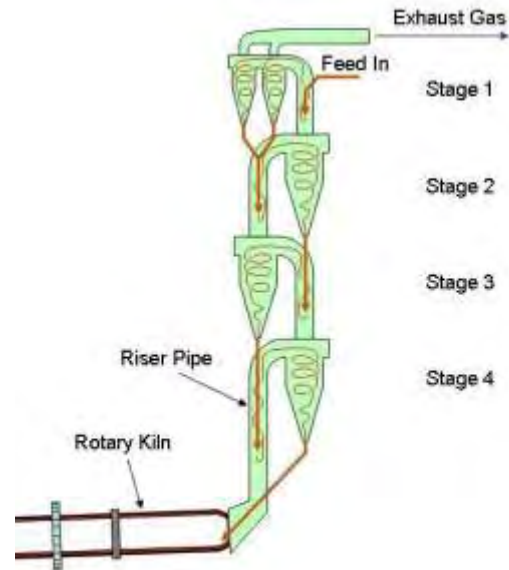
Ο προθερμαντήρας εσχάρας αποτελείται από ένα θάλαμο ο οποίος περιλαμβάνει μια αλυσιδωτή κινούμενη εσχάρα υψηλής θερμοκρασίας από χάλυβα και είναι προσαρμοσμένος στην ψυχρότερη άκρη της καμίνου [33].

3.3.2 Προθερμαντήρας με αιώρηση σωματιδίων

Η σημαντικότερη παράμετρος αυτού του προθερμαντήρα είναι ο κυκλώνας (Εικόνα 3-9). Από τη μια μεριά του κυκλώνα περνά η φαρίνα και από την άλλη τα καυσαέρια της καμίνου. Έτσι γίνεται μία αποδοτική μεταφορά θερμότητας από τα καυσαέρια προς τη φαρίνα. Με αυτό τον τρόπο, η περιεχόμενη ενθαλπία των καυσαερίων που θα χανότανε στην ατμόσφαιρα μπορεί να αξιοποιηθεί. Η απόδοση της μεταφοράς θερμότητας μπορεί να αυξηθεί με την προσθήκη πολλών κυκλώνων σε σειρά (2-6 κυκλώνες). Η προσθήκη επιπλέον κυκλώνων προσδίδει πτώση πίεσης στη ροή των καυσαερίων με συνέπεια να είναι αναγκαία η χρήση ανεμιστήρων για την απομάκρυνσή τους από τον αεραγωγό. Η επιλογή του αριθμού κυκλώνων πρέπει να γίνεται προσεκτικά, έτσι ώστε το κόστος λειτουργίας των ανεμιστήρων να μην υπερβαίνει το επιπλέον κόστος καυσίμων που θα χρησιμοποιούνταν για τη θέρμανση της φαρίνας χωρίς τον κυκλώνα. Ο πιο συνηθισμένος αριθμός κυκλώνων είναι 4 (Εικόνα 3-10).



Εικόνα 3-9: Τομή συμβατικού κυκλώνα [34]



Εικόνα 3-10: Προθερμαντήρας συστοιχίας 4 κυκλώνων [35]

3.4 Προασβεστοποιητής

Ο προασβεστοποιητής (precalciner), στον οποίο επιτελείται η προπύρωση του ασβεστόλιθου, αποτελεί μία εξελιγμένη διάταξη του προθερμαντήρα με αιώρηση και αυξάνει την ενεργειακή αποδοτικότητα, καθώς μειώνει την αχρησιμοποίητη αποβαλλόμενη ενέργεια (heat wastage) [36]. Γενικά η παραγωγικότητα ενός εργοστασίου παραγωγής τσιμέντου είναι άμεσα συνδεδεμένη με το μέγεθος της καμίνου και της δυνατότητάς της για καύση συγκεκριμένης ποσότητας καυσίμου.

Ένας τρόπος αύξησης της παραγωγικότητας είναι η καύση καυσίμου στη βάση του προθερμαντήρα σε ειδικά προσαρμοσμένο θάλαμο καύσης που αποτελεί τον προασβεστοποιητή «air-through» (Εικόνα 3-11). Με αυτή τη μέθοδο η τροφοδοσία εισέρχεται στην κάμινο έχοντας υποστεί ήδη ασβεστοποίηση σε ποσοστό 40-50%, έναντι του 5-10% που θα εισερχόταν χωρίς τον προασβεστοποιητή.

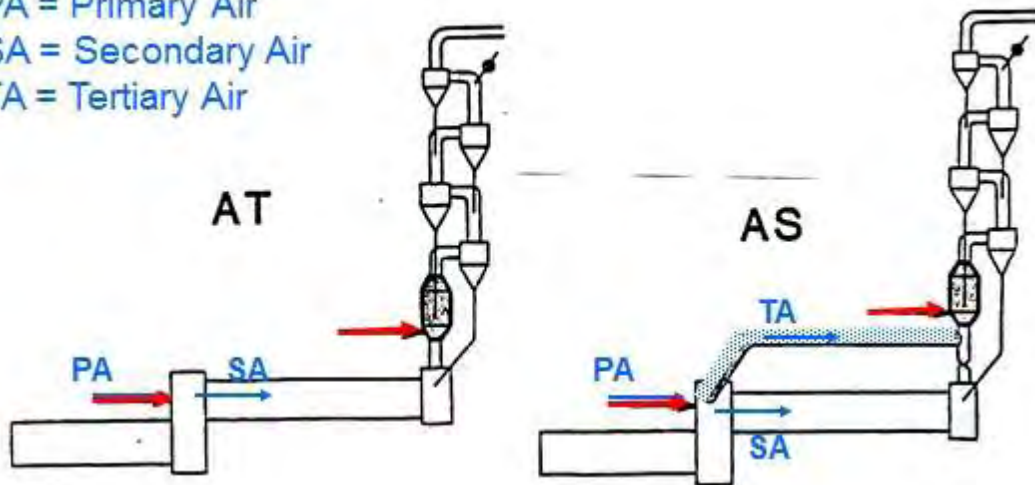
Ο δεύτερος τύπος προασβεστοποιητή είναι ο «air-separate precalciner» στον οποίο εισέρχεται ένα επιπλέον ρεύμα αέρα από τον ψύκτη με εσχάρα (grate cooler), δίνοντας τη δυνατότητα στον precalciner να καίει αποδοτικά το 70% του συνολικού καυσίμου (Εικόνα 3-12). Η φαρίνα έχει υποστεί ασβεστοποίηση 90-95% πριν από την είσοδό της στην κάμινο. Με τη μέθοδο αυτή μπορεί να μειωθεί δραματικά το μέγεθος της καμίνου, η οποία πλέον είναι απαραίτητη μόνο για τη διαδικασία πυροσυσσώματωσης (sintering). Έτσι μειώνονται και οι απώλειες θερμότητας από το κέλυφος της καμίνου.

Definitions:

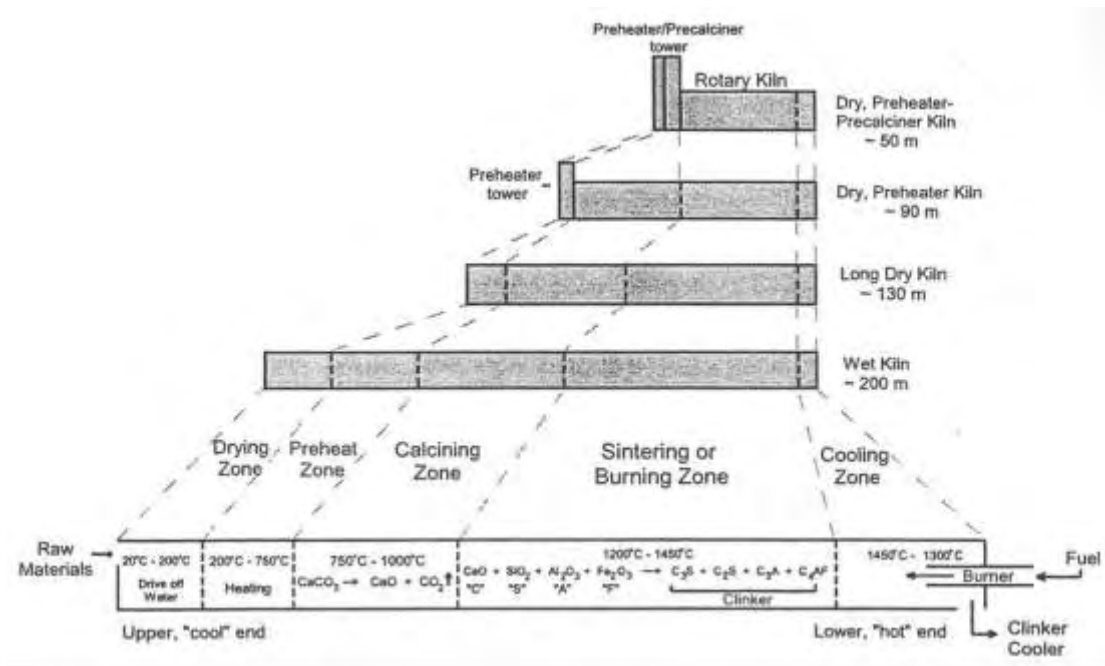
PA = Primary Air

SA = Secondary Air

TA = Tertiary Air



Εικόνα 3-11: Σχηματική απεικόνιση air-through(AT) και air-swept(AS) προασβεστοποιητή [37]



Εικόνα 3-12: Μεταβολή μεγέθους καμίνου σύμφωνα με τον υφιστάμενο εξοπλισμό [38]

3.5 Συστήματα ψύξης

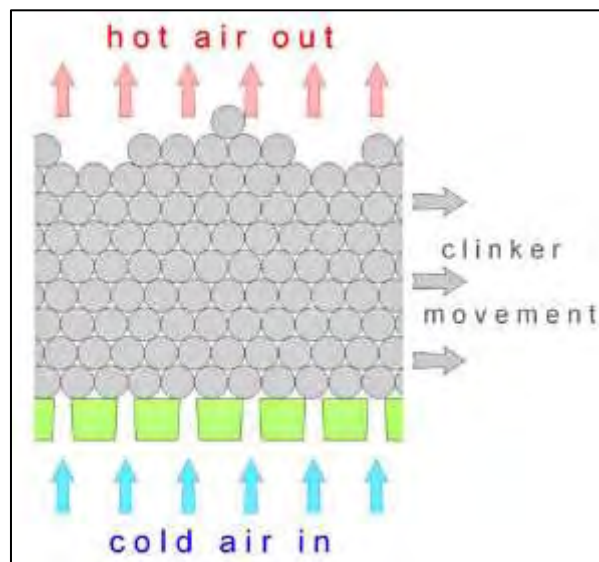
Έχει διαπιστωθεί ότι ουσιαστικό ρόλο στην ποιότητα του κλίνκερ και στις ιδιότητες του παραγόμενου τσιμέντου παίζουν οι διεργασίες ψύξης του κλίνκερ που εξέρχεται από την κάμινο. Σημαντικό επίσης οικονομικό όφελος προσφέρει η αξιοποίηση (ποσοστού 35% περίπου) της απαγόμενης από το κλίνκερ θερμότητας, μέσω του αέρα ψύξης. Η θερμότητα που ανακτάται αξιοποιείται για την προθέρμανση της τροφοδοσίας των πρώτων υλών και για την έναυση του καυσίμου στον ασβεστοποιητή, συμβάλλοντας στην ενεργειακή βελτιστοποίηση της διεργασίας

παραγωγής κλίνκερ. Οι κύριοι τύποι ψυκτών κλίνκερ είναι τύπου κινούμενης εσχάρας και περιστροφικού ή πλανητικού τύπου.

Όπως προαναφέρθηκε, οι ιδιότητες του παραγόμενου κλίνκερ εξαρτώνται κατά κύριο λόγο από την ταχύτητα, δηλαδή από το ρυθμό ψύξης του κλίνκερ. Και τούτο, διότι η ταχεία ψύξη που διενεργείται λίγο πριν την έξοδο της καμίνου, αλλά ιδιαίτερα στους ψύκτες του κλίνκερ, έχει σημαντική επίδραση στο μέγεθος των κρυστάλλων των φάσεων alite και belite που παράγονται. Το μέγεθος των κρυστάλλων έχει μεγάλη σημασία για τις ιδιότητες του κλίνκερ και του τσιμέντου που θα παραχθεί από αυτό.

3.5.1 Ψύκτες με εσχάρα

Οι ψύκτες με εσχάρα (grate coolers) αποτελούνται από ένα ή περισσότερα τμήματα εσχάρας το καθένα από τα οποία ορίζονται με βάση την θέση τους, τη λειτουργία τους ή από το αν είναι συνδεδεμένοι σε κάποιο οδηγό (για παράδειγμα σχάρα εισαγωγής - inlet grate, δεύτερη κινούμενη εσχάρα και τα λοιπά). Το κύριο χαρακτηριστικό ενός ψύκτη εσχάρας είναι ότι ένα στρώμα κλίνκερ απλώνεται σε μία περίπου οριζόντια διάτρητη εσχάρα, μέσω της οποίας περνά κρύος αέρας. Η εσχάρα είναι κατασκευασμένη από ατσάλι, με αποτέλεσμα ο κρύος αέρας να τη διατηρεί σε κατάλληλη θερμοκρασία ώστε να αποφεύγεται η υπερθέρμανση και η τήξη της. Το κλίνκερ, καθώς μετακινείται οριζόντια κατά μήκος της εσχάρας, διαπερνάται από τον κρύο αέρα σταυρωτά και έτσι ο ψύκτης λειτουργεί ως εναλλάκτης θερμότητας διασταυρούμενης ροής (cross-current heat exchanger), όπως δείχνει η Εικόνα 3-13. Μία τυπική διάταξη ψύκτη με εσχάρα παρουσιάζεται στην Εικόνα 3-14.

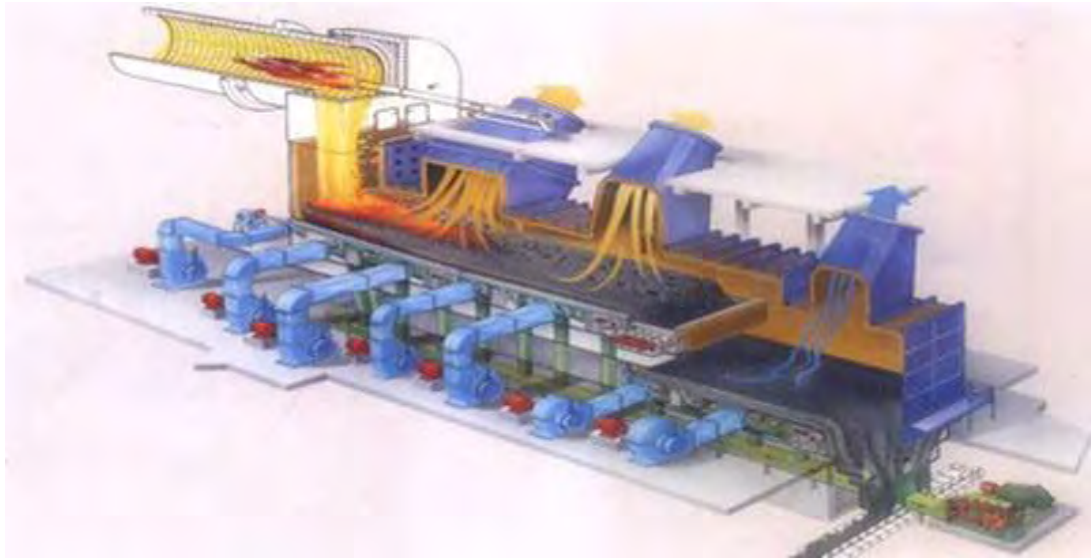


Εικόνα 3-13: Διασταυρούμενη ροή σε ψύκτη εσχάρας [39]

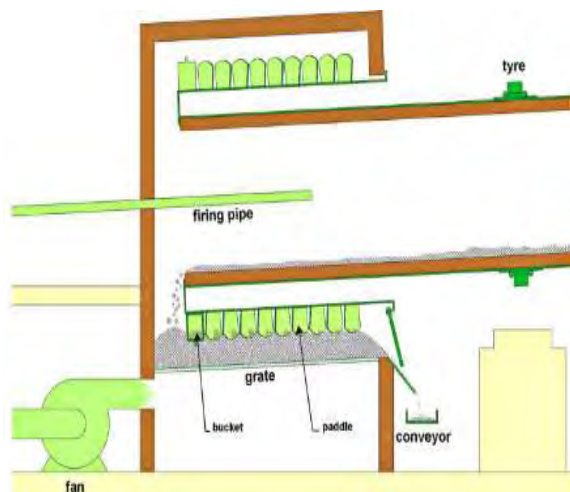
Οι πιο συνηθισμένες κατηγορίες ψύκτη εσχάρας είναι:

- bucket grate cooler (Εικόνα 3-15),

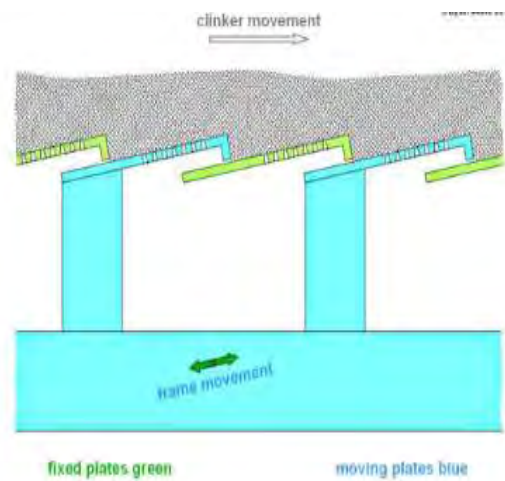
- reciprocating grate cooler (Εικόνα 3-16).



Εικόνα 3-14: Ψύκτης με εσχάρα [40]



Εικόνα 3-15: Bucket grate cooler [41]



Εικόνα 3-16: Reciprocating grate cooler [42]

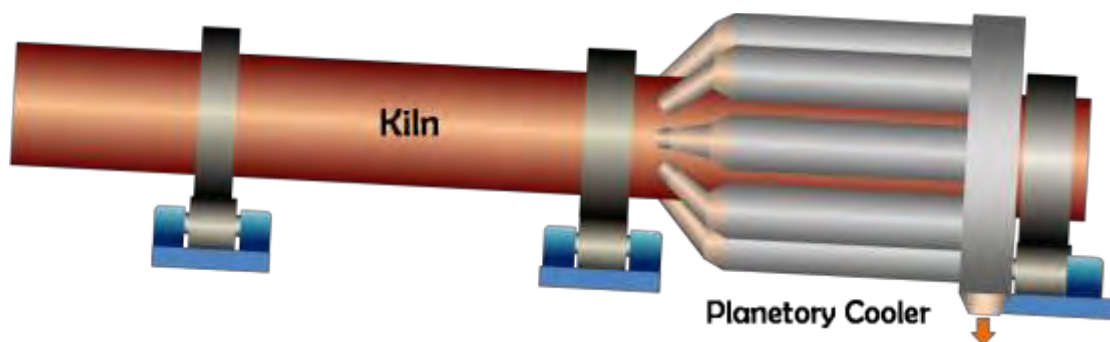
3.5.2 Περιστροφικός ή πλανητικός ψύκτης

Ο πλανητικός ψύκτης (planetary/satellite cooler) αποτελείται από 10 περίπου αυλούς [43] που είναι προσαρμοσμένοι στην εξωτερική επιφάνεια της περιστροφικής καμίνου και στο τελευταίο άκρο αυτού προς την έξοδο, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3-17. Οι αυλοί επικοινωνούν με την κάμινο με το ένα άκρο τους, από όπου εισέρχεται το κλίνκερ, ενώ από το άλλο άκρο εισάγεται ο αέρας με

αναρρόφηση ο οποίος ψύχει το κλίνκερ. Ο θερμός αέρας οδηγείται πλέον ως δευτερογενής αέρας καύσης. Στην Εικόνα 3-18 παρουσιάζεται μία σχηματική απεικόνιση του πλανητικού ψύκτη.



Εικόνα 3-17: Πλανητικός ψύκτης [44]



Εικόνα 3-18: Σχηματική απεικόνιση πλανητικού ψύκτη [45]

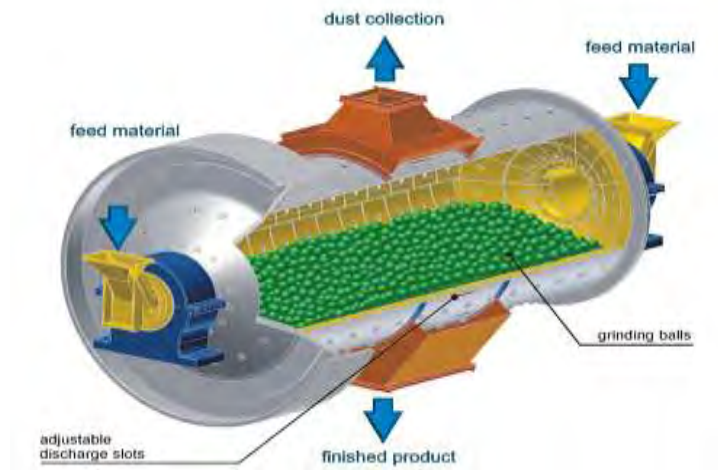
3.6 Μύλοι άλεσης

Ως άλεση (grinding) χαρακτηρίζεται η διαδικασία του λεπτότατου διαμελισμού των πρώτων υλών για την παραγωγή φαρίνας, τσιμέντου και γαιάνθρακα για καύση. Η σημασία της άλεσης είναι μεγάλη στην τσιμεντοβιομηχανία. Η φαρίνα αλέθεται προκειμένου να αυξηθεί η επιφάνεια αντίδρασης, κάνοντας έτσι πιο σύντομη τη διαδικασία δημιουργίας κλίνκερ. Από την άλλη, στο τσιμέντο η άλεση επιδρά στο χρόνο ανάπτυξης αντοχών και στη γρηγορότερη ενεργοποίηση νέων σωματιδίων, καθώς η συνολική επιφάνεια που έρχεται σε επαφή με το νερό μεγαλώνει.

Η άλεση της φαρίνας και του τσιμέντου επιτυγχάνεται σε σωληνωτούς μύλους (tube mills), σε σφαιρόμυλους (ball mills) και σε κυλινδρόμυλους (roller mills). Ευρεία και σχεδόν αποκλειστική είναι η χρήση των σφαιρόμυλων στην τσιμεντοβιομηχανία, ειδικά για την άλεση κλίνκερ.

3.6.1 Σφαιρόμυλοι

Οι σφαιρόμυλοι-Ball mills (Εικόνα 3.19) είναι κυλινδρικές διατάξεις, μερικώς γεμισμένες με ανοξειδωτες ατσάλινες ή κεραμικές σφαίρες (Εικόνα 3.20). Καθώς οι σφαιρόμυλοι περιστρέφονται σηκώνουν τις σφαίρες οι οποίες στη συνέχεια λόγω βαρύτητας πέφτουν και αλέθουν την φαρίνα που περνά διαμέσου των μύλων με κρούση και τριβή.



Εικόνα 3-19: Σφαιρόμυλος [46]



Εικόνα 3-20: Σφαίρες σφαιρόμυλου [47]

Στον Πίνακα 3-1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά μεγέθη των σφαιρών που χρησιμοποιούνται στους σφαιρόμυλους.

Πίνακας 3-1: Σφαιρόμυλος - βάρος σφαιρών και ενεργός επιφάνεια [48]

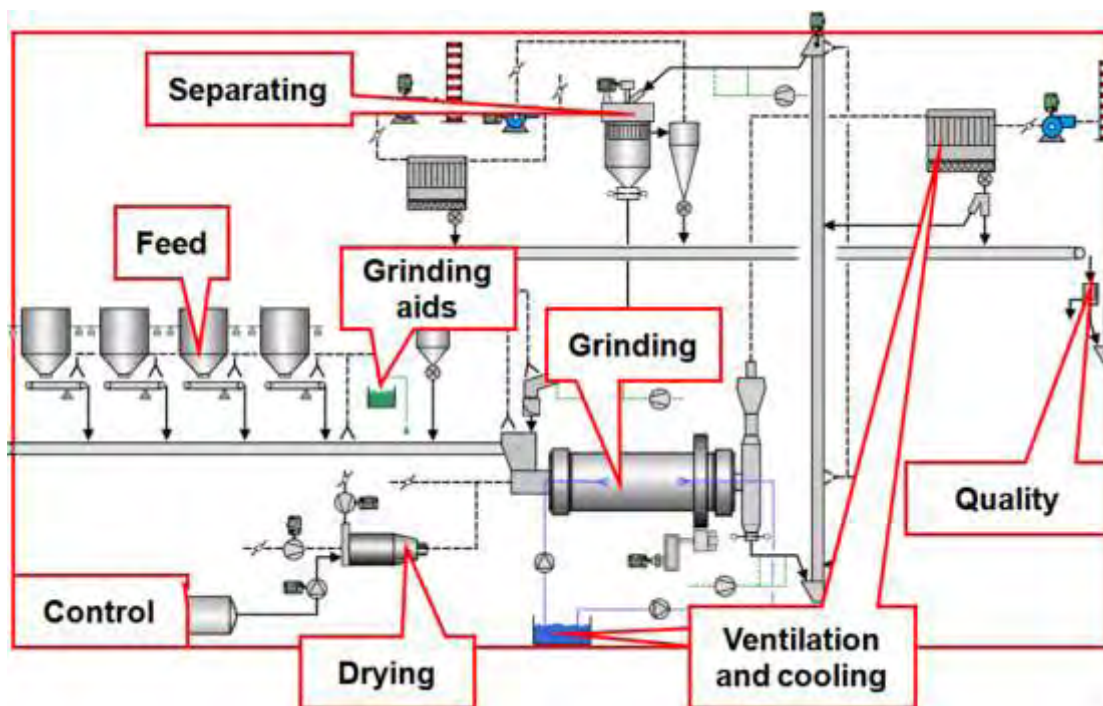
Ball Mill-Ball Weight & Surface Area

Diameter (mm)	kg/ball	No of balls/MT	Surface area M ² /MT
20	0.033	30,600	38.46
25	0.064	15,700	30.77
30	0.11	9,100	25.64
40	0.261	3,830	19.23
50	0.511	1,960	15.38
60	0.882	1,130	12.82
70	1.4	710	10.99
80	2.09	480	9.60
90	2.977	336	8.55
100	4.084	245	7.69

Steel density is assumed 7.8g/cm³.

Bulk density of a mixed ball charge may be taken as 4550kg/m³.

Στην Εικόνα 3-21 παρουσιάζεται ο μηχανολογικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στη διαδικασία της άλεσης.



Εικόνα 3-21: Μηχανολογικός εξοπλισμός που χρησιμοποιείται στη διαδικασία της άλεσης [49]

Κεφάλαιο 4: Περιβάλλον - Δεδομένα εκπομπών και ανάγκη μείωσης τους

Η ρύπανση του περιβάλλοντος είναι ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα που αντιμετωπίζει η ανθρωπότητα στις μέρες μας. Η ατμοσφαιρική ρύπανση αποτελεί σημαντικό κομμάτι της ρύπανσης του περιβάλλοντος με συνέπειες στην υγεία του ανθρώπου και των ζώων, στο οικοσύστημα, τις καλλιέργειες και στο κλίμα του πλανήτη. Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι οφείλονται εν μέρει στην ανθρώπινη δραστηριότητα αλλά και σε φυσικούς παράγοντες. Έχει αποδειχθεί ότι η ανθρώπινη δραστηριότητα παίζει μεγάλο ρόλο στην ατμοσφαιρική ρύπανση και γι' αυτό πρέπει να ληφθούν μέτρα για τον περιορισμό της. Οι ατμοσφαιρικοί ρύποι μπορεί να είναι πρωτογενείς, που σε αυτήν την περίπτωση εκπέμπονται απευθείας στην ατμόσφαιρα, ή δευτερογενείς. Στη δεύτερη περίπτωση, ουσίες που αρχικά δεν είναι ρύποι μετατρέπονται σε ρύπους μετά από αντιδράσεις που γίνονται στην ατμόσφαιρα. Η βιομηχανική δραστηριότητα είναι ένας από τους κυριότερους ανθρώπινους παράγοντες δημιουργίας και απελευθέρωσης ατμοσφαιρικών ρύπων. Συγκεκριμένα, η τσιμεντοβιομηχανία είναι υπεύθυνη για μεγάλο μέρος του αποτυπώματος άνθρακα (carbon footprint), καθώς είναι μια άκρως ενεργοβόρα βιομηχανία. Πέρα από αυτό, η διαδικασία παραγωγής τσιμέντου αυτή κάθε αυτή παράγει μεγάλα ποσά CO₂. Για το λόγο αυτό παρατίθεται σε ξεχωριστό υποκεφάλαιο.

Στη συνέχεια θα αναφερθούν και θα αναλυθούν οι σημαντικότεροι αέριοι ρύποι και θα παρουσιαστούν δεδομένα συγκέντρωσής τους. Σε τελικό στάδιο θα αναλυθεί η σημασία έρευνας κι εφαρμογής μεθόδων (BAT) για την μείωση της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών αέριων ρύπων στην τσιμεντοβιομηχανία.

4.1 Αέριοι ρύποι της τσιμεντοβιομηχανίας

Το μεγαλύτερο μέρος των εκπομπών στην τσιμεντοβιομηχανία προκύπτει από το στάδιο της καύσης στην περιστροφική κάμινο. Οι κυριότεροι ρύποι, πέρα του CO₂, που απελευθερώνονται είναι:

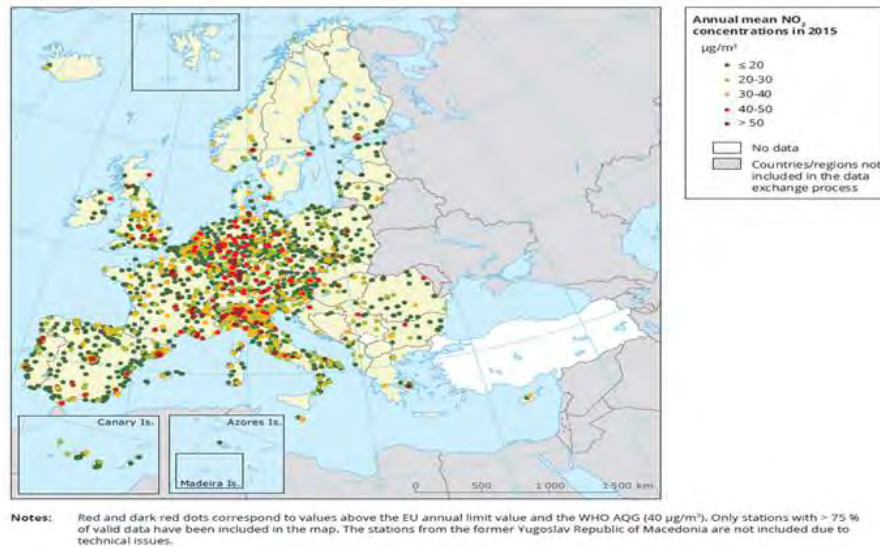
- οξείδια του αζώτου (NO_x),
- διοξείδιο του θείου (SO₂),
- σκόνη (Αιωρούμενα σωματίδια - PM),
- πτητικές οργανικές ουσίες (VOC),
- πολυχλωρικές διβενζοδιοξίνες και διβενζοφουράνια (PCDDs and PCDFs),
- μέταλλα και προϊόντα τους,
- υδροφθόριο (HF),
- υδροχλώριο (HCl),
- μονοξείδιο του άνθρακα (CO),
- αμμωνία (NH₃).

4.1.1 Οξείδια του αζώτου

Τα οξείδια του αζώτου (NO_x) παράγονται κατά της διαδικασία καύσης, είτε από την οξείδωση του αζώτου που περιέχεται στον αέρα καύσης (thermal NO_x) είτε από το άζωτο που περιέχεται στα καύσιμα (fuel NO_x). Τα θερμικά NO_x (thermal NO_x) παράγονται σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 1200°C. Λόγω των μεγάλων θερμοκρασιών που επικρατούν στον κλίβανο τα θερμικά NO_x

κυριαρχούν. Το μονοξείδιο του αζώτου (NO) αποτελεί το 95% των εκπομπών NO_x, ενώ το διοξείδιο του αζώτου (NO₂) αποτελεί το υπόλοιπο 5%. Κατά μέσο όρο ένα εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου στην Ευρώπη εκπέμπει περίπου 1300 mg NO_x/m³ (ξηρό καύσιμο, 273 K, 101.3 kPa, 10% O₂) [50].

Στη συνέχεια, στην Εικόνα 4-1 παρουσιάζονται στοιχεία για τη συγκέντρωση NO₂ στην Ευρώπη. Τα στοιχεία προκύπτουν από τον οργανισμό **ΕΕΑ**.



Εικόνα 4-1: Συγκεντρώσεις NO₂ για το 2015 [51]

4.1.2 Διοξείδιο του θείου

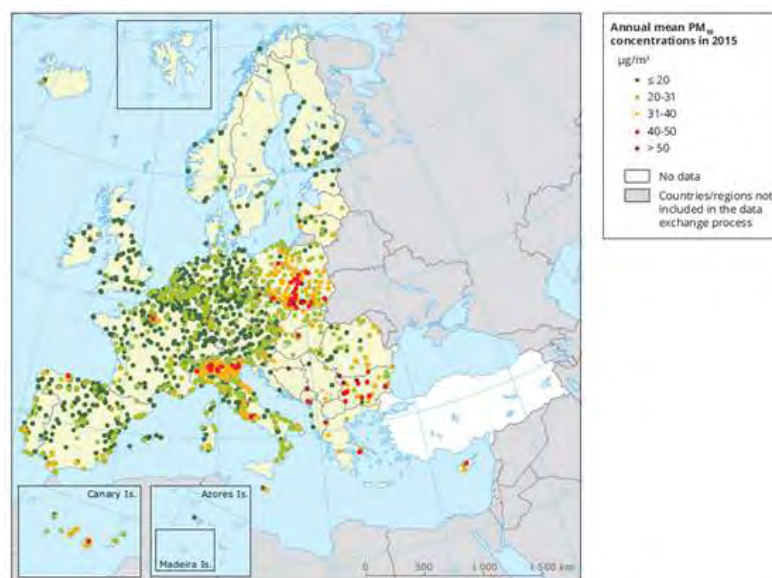
Οι εκπομπές διοξειδίου του θείου (SO₂) καθορίζονται κυρίως από την περιεκτικότητα των πρώτων υλών σε πτητικό θείο. Το θείο εκπέμπεται στη μορφή SO₂ από την άκρη του κλιβάνου που έχει μικρότερη θερμοκρασία. Μόνο ένα μέρος του θείου, που βρίσκεται στις πρώτες ύλες σε μορφή θειικού άλατος, αντιδρά σε υψηλές θερμοκρασίες, ενώ το υπόλοιπο απορρίπτεται από τον κλίβανο εμπεριεχόμενο στο κλίνκερ. Το θείο που απελευθερώνεται από τα καύσιμα στη θερμότερη μεριά του κλιβάνου οξειδώνεται και γίνεται SO₂, το μεγαλύτερο μέρος του οποίου δε θα απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα, αφού αντιδρά με τις πρώτες ύλες στην ζώνη τήξης (sintering zone), στον προ-αβεστοποιητή και στο θερμότερο μέρος του προθερμαντήρα. Δεδομένα για τη συγκέντρωση του SO₂ στην Ευρώπη, σύμφωνα με το **ΕΕΑ**, φαίνονται στην Εικόνα 4-2.



Εικόνα 4-2: Συγκεντρώσεις SO₂ στην Ευρώπη [52]

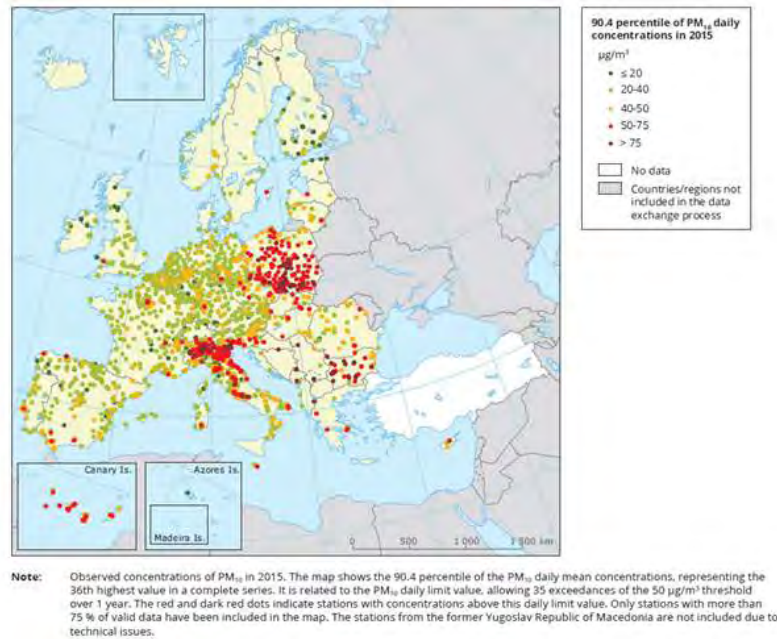
4.1.3 Σκόνη

Η σκόνη (dust), συμπεριλαμβανομένων των PM, όπως φαίνονται στις Εικόνες 4-3, 4-4, 4-5, εκπέμπεται κυρίως από την καπνοδόχο του συστήματος της καμίνου, καθώς και κατά τη διαδικασία άλεσης και τη μεταφορά και αποθήκευση των πρώτων υλών, των καυσίμων και του τσιμέντου. Σημειώνεται ότι τα ηλεκτροστατικά φίλτρα έχουν βοηθήσει σημαντικά στη μείωση εκπομπών σκόνης.

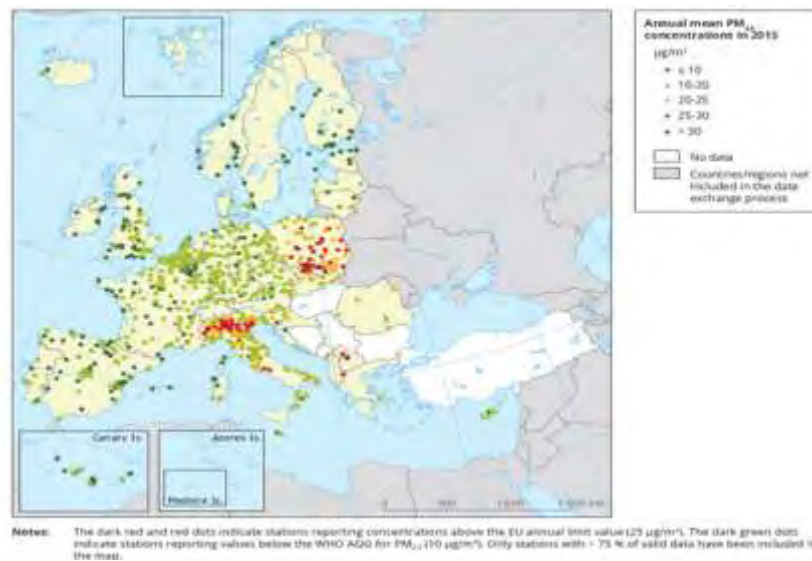


Notes: The dark red and red dots indicate stations reporting concentrations above the EU annual limit value (40 µg/m³). The dark green dots indicate stations reporting values below the WHO AGG for PM₁₀ (20 µg/m³). Only stations with > 75% of valid data have been included in the map. The stations from the former Yugoslav Republic of Macedonia are not included due to technical issues.

Εικόνα 4-3: Συγκεντρώσεις PM₁₀ στην Ευρώπη για το έτος 2015 [53]



Εικόνα 4-4: Ημερήσιες συγκεντρώσεις PM_{10} για το έτος 2015 στην Ευρώπη [54]



Εικόνα 4-5: Συγκεντρώσεις $PM_{2.5}$ στην Ευρώπη για το έτος 2015 [55]

4.1.4 Ενώσεις χλωρίου και φθορίου

Οι ενώσεις χλωρίου και φθορίου εισάγονται στο σύστημα καμίνου από τις πρώτες ύλες και από τα καύσιμα. Το μεγαλύτερο μέρος τους δεσμεύεται από τις λεπτές πρώτες ύλες και απορρίπτονται από το σύστημα καμίνου με το κλίνκερ. Ωστόσο, ένα μικρό μέρος τους απελευθερώνεται όντας προσκολλημένο στα σωματίδια σκόνης που απελευθερώνονται με τα απαέρια καύσης.

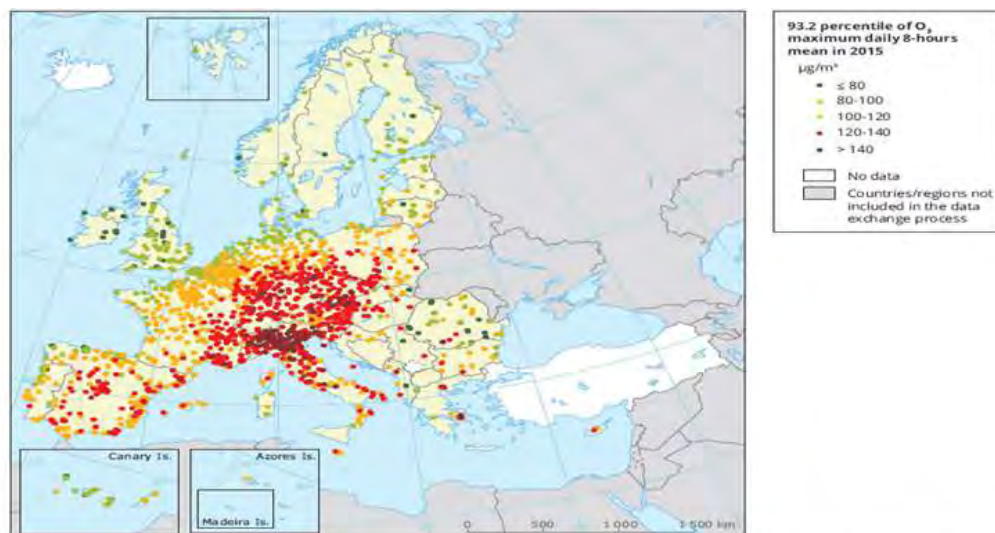
4.1.5 Πτητικές οργανικές ενώσεις, μονοξείδιο του άνθρακα και αμμωνία

Οι εκπομπές πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC), κάποιες από τις οποίες παρουσιάζονται στις Εικόνες 4-6 και 4-7, μονοξειδίου του άνθρακα (CO και αμμωνίας NH₃) γίνονται κατά τα πρώτα στάδια του συστήματος καμίνου, στον προθερμαντήρα και στον προασβεστοποιητή, όταν ακαθαρσίες, όπως οργανική ύλη, που εμπεριέχονται στις πρώτες ύλες εξατμίζονται καθώς ζεσταίνονται.



Notes: Dark red dots correspond to concentrations above the limit value of 5 µg/m³. Dark green dots correspond to concentrations under the estimated WHO reference level (1.7 µg/m³). Only stations reporting more than 50 % of valid data have been included in the map.

Εικόνα 4-6: Concentration of benzene, 2015 [56]



Notes: Observed concentrations of O₃ in 2015. The map shows the 93.2 percentile of the O₃ maximum daily 8-hour mean, representing the 26th highest value in a complete series. It is related to the O₃ target value, allowing 25 exceedances over the 120-µg/m³ threshold. At sites marked with red and dark-red dots, the 26th highest daily O₃ concentrations were above the 120-µg/m³ threshold, implying an exceedance of the target value threshold. Only stations with more than 75 % of valid data have been included in the map. The stations from the former Yugoslav Republic of Macedonia are not included due to technical issues.

Εικόνα 4-7: Συγκεντρώσεις O₃ στην Ευρώπη για το έτος 2015 [57]

4.1.6 Πολυχλωρικές διβενζοδιοξίνες και διβενζοφουράνια

Οι πολυχλωρικές διβενζοδιοξίνες ή διοξίνες (PCCDs) και τα διβενζοφουράνια ή απλά φουράνια (PCDFs) δημιουργούνται μέσα στον προθερμαντήρα όσο και στην έξοδό του αλλά και στις συσκευές ελέγχου αέριας ρύπανσης όταν υπάρχει ικανοποιητική συγκέντρωση χλωρίου και πρόδρομων υδρογονανθράκων (hydrocarbon precursors) από τις πρώτες. Στο κεφάλαιο «Εναλλακτικά καύσιμα» γίνεται εκτενέστερη περιγραφή αυτών. Ο ανασχηματισμός των διοξινών και των φουρανίων είναι γνωστό ότι πραγματοποιείται μέσω σύνθεσης De Novo κατά την ψύξη από 450 στους 200°C που λαμβάνει χώρα μετά το σύστημα της καμίνου. Συνεπώς η ψύξη θα πρέπει να γίνεται με πολύ γρήγορο ρυθμό προκειμένου να περιοριστεί ο ανασχηματισμός τους. Στην πράξη αυτό επιτυγχάνεται στο σύστημα προθερμαντήρα όπου η εισερχόμενη πρώτη ύλη προθερμαίνεται από τα αέρια εξόδου της καμίνου. Στην τσιμεντοβιομηχανία της Ευρώπης η παραγωγή τους είναι συνήθως αμελητέα, ακόμα και στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται απορρίμματα ως καύσιμα, αφού η θερμοκρασίες που αναπτύσσονται είναι πάρα πολύ υψηλές.

4.1.7 Μέταλλα

Τα μέταλλα εισάγονται στον κλίβανο είτε μέσω των πρώτων υλών, είτε μέσω των καυσίμων. Το μεγαλύτερο μέρος των μετάλλων δεσμεύεται από το κλίνκερ. Ωστόσο, μέταλλα που είναι πολύ πτητικά όπως ο υδράργυρος (Hg) και το θάλλιο (Tl) μπορεί να μη δεσμευτούν τόσο αποτελεσματικά από το κλίνκερ και απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Πιο ειδικά, τα μέταλλα, μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με την πτητικότητα τους και την περιεκτικότητά τους σε άλατα σε τρεις κατηγορίες:

1. μέταλλα τα οποία δεν είναι πτητικά: Ba, Be, Cr, As, Ni, V, Al, Ti, Ca, Fe, Mn, Cu και Ag,
2. μέταλλα τα οποία είναι μερικώς πτητικά ή περιέχουν ενώσεις που είναι μερικώς πτητικές: Sb, Cd, Pb, Se, Zn, K και Na,
3. μέταλλα που είναι πτητικά ή περιέχουν ουσίες που είναι πτητικές: Hg and Tl [58].

Στον Πίνακα 4-1 παρατίθενται τα επιτρεπόμενα εύρη τιμών των εκπεμπόμενων ρύπων που προέρχονται από την τσιμεντοβιομηχανία:

Πίνακας 4-1: Εύρη τιμών εκπομπών από ευρωπαϊκά εργοστάσιος παραγωγής τσιμέντου [59]

	mg/Nm ³	kg/tonne clinker	tonnes/year
NO _x (as NO ₂)	<200-3000	<0.4-6	400-6000
SO ₂	<10-3500	<0.02-7	<20-7000
Dust	5-200	0.01-0.4	10-400
CO	500-2000	1-4	1000-4000
CO ₂	400-520 g/Nm ³	800-1040	0.8-1.04 million
TOC	5-500	0.01-1	10-1000
HF	<0.4-5	<0.8-10 g/t	<0.8-10
HCl	<1-25	<2-50 g/t	<2-50
PCDD/F	<0.1-0.5 ng/Nm ³	<200-1000 ng/t	<0.2-1 g/year
Metals:			
Σ (Hg, Cd, Tl)	0.01-0.3 (mainly Hg)	20-600 mg/t	20-600 kg/year
Σ (As, Co, Ni, Se, Te)	0.001-0.1	2-200 mg/t	2-200 kg/year
Σ (Sb, Pb, Cr, Cu, Mn, V, Sn, Zn)	0.005-0.3	10-600 mg/t	10-600 kg/year

Note: Mass figures are based on 2000 m³/tonne clinker and 1 million tonnes clinker/year. Emission ranges are one-year averages and are indicative values based on various measurement techniques. O₂-content is normally 10%.

Οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν για τη σύνταξη του κεφαλαίου 4.1 παρατίθενται στο κεφάλαιο αναφορών [1*].

4.2 Αέριοι ρύποι - Κίνδυνοι και συνέπειες

Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η σημασία του ελέγχου της αέριας ρύπανσης και η ανάγκη για τη μείωση τους, σημαντικό είναι να αναφερθούν οι συνέπειες που θα επέλθουν σε περίπτωση υπέρβασης των επιτρεπόμενων ορίων.

4.2.1 Οξείδια του αζώτου

Τα οξείδια του αζώτου (NO_x) συνεισφέρουν στην αιθαλομίχλη, είναι επιβλαβή για τα φυτά και τα ζώα και μπορούν να θέσουν την ανθρώπινη υγεία σε κίνδυνο. Ακόμα, συνεισφέρουν στις όξινες αποθέσεις. Είναι επίσης γνωστό ότι τα NO_x, με την παρουσία φωτός, αντιδρούν με χημικά ενεργές πτητικές οργανικές ενώσεις σχηματίζοντας φωτοχημικούς οξειδωτικούς παράγοντες. Υπερβολικές συγκεντρώσεις NO_x στην ατμόσφαιρα μπορούν να γίνουν αντιληπτές ακόμα και με γυμνό μάτι, αφού προσδίδουν μια καστανόχρωμη απόχρωση στην ατμόσφαιρα, ένα φαινόμενο που εξηγείται στο ότι τα NO_x απορροφούν ισχυρά την περιοχή μπλε-πράσινο του ορατού φάσματος [60]. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί σε μείωση της ορατότητας και είναι αισθητικά ενοχλητικό. Όσο αφορά τη χλωρίδα, τα πλατύφυλλα φυτά δεν μπορούν να επιβιώσουν σε συγκέντρωση 2-10 ppm NO₂, ενώ παρατηρείται μείωση της ανάπτυξής τους στα 0,5 ppm [61]. Στους ανθρώπους προκαλεί ερεθισμό στη μύτη και στα μάτια, πνευμονικό οίδημα ή φλεγμονή, βρογχίτιδα μέχρι και πνευμονία, όταν τα επίπεδα συγκεντρώσεων βρίσκονται περί τα 10-30 ppm. Ωστόσο, ακόμη και όταν οι συγκεντρώσεις είναι χαμηλότερες από τις προαναφερθείσες, μακροχρόνια έκθεση σε αυτές προκαλεί τη δημιουργία πνευμονικών ινώσεων και εμφυσήματος [62]. Μεταγενέστερες μελέτες που έγιναν από τους *Hasselblad, Eddy και Kotchmar (1992)* δείχνουν ότι τα NO_x μπορεί να είναι επικίνδυνα ακόμα και σε πολύ χαμηλότερες συγκεντρώσεις.

4.2.2 Οξείδια του θείου

Το διοξείδιο του θείου (SO₂) έχει συνδεθεί με προβλήματα στην ανθρώπινη υγεία, βλάβες στα φυτά και τα ζώα, με τη δημιουργία αιθαλομίχλης και ελαφριάς ομίχλης μέσω του σχηματισμού όξινων νεφελωμάτων και οξείδωσης των υλικών. Το διοξείδιο του θείου και το τριοξείδιο του θείου (SO₃), το οποίο είναι δευτερογενής ρύπος και σχηματίζεται στην ατμόσφαιρα από το SO₂, διαλύονται στο

νερό της ατμόσφαιρας δημιουργώντας οξέα. Στη συνέχεια τα οξέα αυτά φτάνουν στο έδαφος της γης με την βροχή, φαινόμενο το οποίο ονομάζεται όξινη βροχή, με καταστροφικές συνέπειες. Τα δύο κυριότερα συστατικά που προσδίδουν το 98% της ελεύθερης οξύτητας είναι το HNO_3 και το H_2SO_4 [63]. Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι τη δεκαετία του 1970 πάνω από τα 2/3 της οξύτητας των βροχοπτώσεων στις ΗΠΑ ήταν θειικής προέλευσης και το υπόλοιπο 1/3 λόγω του αζώτου, ενώ πλέον το 60% οφείλεται στο SO_2 και το υπόλοιπο 40% στα NO_x [64].

Η όξινη βροχή μειώνει σημαντικά το pH των λιμνών κάτω του 4,5 οδηγώντας στην κατακόρυφη μείωση του φυτικού και ζωικού πληθυσμού [65]. Στα φυτά προκαλεί χλώρωση, δηλαδή απώλεια της χλωροφύλλης. Ακόμα, προκαλούν επιπλέον ασθένειες και μία γενική μείωση στην ανάπτυξή τους προκαλώντας μειωμένη παραγωγικότητα στη γεωργία και πολλές φορές καταστροφή ολόκληρων σοδιών. Προκαλεί οξείδωση των κατασκευών από χάλυβα και από μάρμαρο κι έτσι αποτελεί πολύ σημαντικό κίνδυνο για αρχαιολογικά μνημεία και τις κατασκευές [66]. Τα SO_2 έχουν παρόμοιες επιπτώσεις στα ζώα και τους ανθρώπους. Σε συγκεντρώσεις άνω του 1ppm, συμβαίνει μερική βρογχοσυστολή, ενώ πάνω από 10ppm παρατηρείται ερεθισμός στα μάτια, τη μύτη και το λαιμό. Το SO_2 προκαλεί έκκριμα βλέννας, ένα χαρακτηριστικό της χρόνιας βρογχίτιδας [67]. Τέλος, τα σωματίδια θεικών αλάτων ή τα αδρανή σωματίδια που περιέχουν SO_2 , διεισδύουν βαθιά μέσα στους πνεύμονες με βαριές επιπτώσεις.

Στη συνέχεια, αναρτάται ο Πίνακας 4-2 με τις επιπτώσεις στην υγεία και τη δόση αντίδρασης για το SO_2 και τα αιωρούμενα σωματίδια (Total Suspended Particles-TSP).

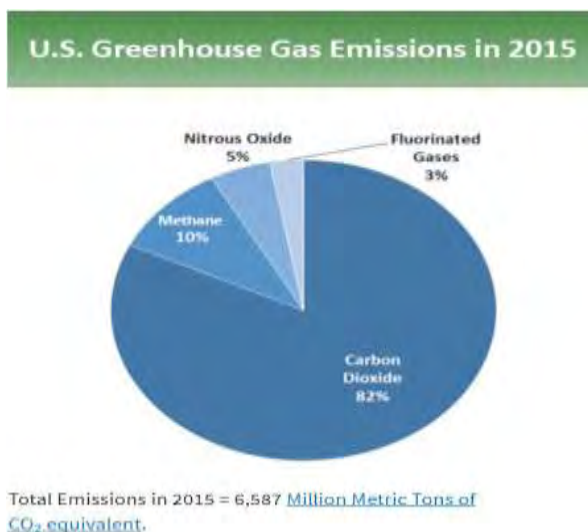
Πίνακας 4-2: Προσαρμοσμένο από το [68]

Περιοχή	Σωματίδια $\mu\text{g}/\text{m}^3$	SO_2 , $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Μέση τιμή χρόνου	Επίπτωση μέτρησης
London	2000 750 500	1040 710 500	24 hr 24 hr 24 hr	Θνησιμότητα Θνησιμότητα Επιδείνωση της βρογχίτιδας
New York City	145	286	24 hr	Αυξημένη επικράτηση των αναπνευστικών συμπτωμάτων
Birginham, AL	200	26	24 hr	Αυξημένη επικράτηση των αναπνευστικών συμπτωμάτων
London	200	400	1 week	Αυξημένη επικράτηση των αναπνευστικών συμπτωμάτων
Britain	200	200	6 months	Βρογχίτιδα, ασθένεια, απουσία από την εργασία
Britain	70	90	1 year	Μολύνσεις του κάτω αναπνευστικού

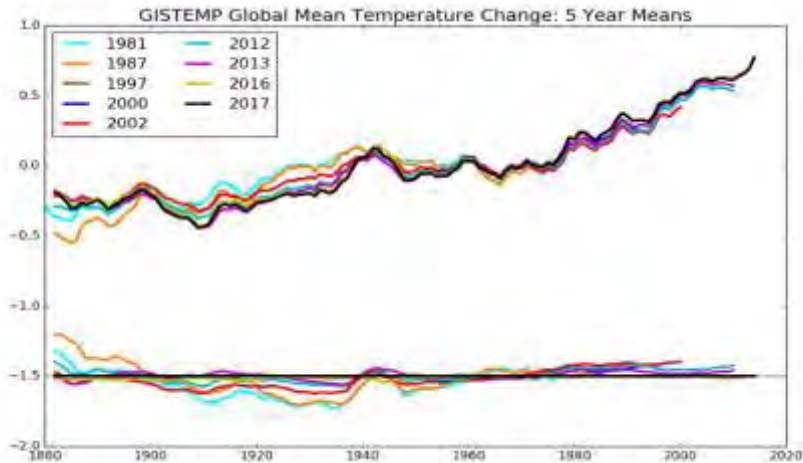
4.2.3 Διοξείδιο του άνθρακα

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) είναι ένα από τα 3 κύρια αέρια του θερμοκηπίου, μαζί με το μεθάνιο (CH_4) και οξείδιο του αζώτου (N_2O). Μάλιστα όπως φαίνεται από το παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 4-3) κυριαρχεί ανάμεσα στα 3 με πολύ μεγάλη διαφορά. Το φαινόμενο του θερμοκηπίου ευθύνεται για την υπερθέρμανση του πλανήτη, γεγονός που έχει καταστρεπτικές συνέπειες στη διατήρηση της ζωής και της βιοποικιλότητας. Αυτός ο κίνδυνος προκύπτει από τα έντονα καιρικά φαινόμενα και την αύξηση της στάθμης της θάλασσας που μπορεί να προκαλέσει έστω και μία μικρή αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη [69]. Δυστυχώς, ο τρόπος με τον οποίο είναι δομημένος ο σύγχρονος πολιτισμός και η προσκόλλησή του σε μη ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές (ορυκτά καύσιμα) έχει ως συνέπεια την απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων αερίων του θερμοκηπίου, τα οποία οδηγούν σε υπερθέρμανση, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 4-4. Η πρόβλεψη που έχει γίνει είναι ότι η μέση τιμή των θερμοκρασιών θα αυξάνεται κατά $2,5^\circ\text{C}$ για τα επόμενα 100 χρόνια. Σημειώνεται ότι προηγούμενα 100 χρόνια η αντίστοιχη αύξηση ήταν $0,6^\circ\text{C}$.

Έτσι, γίνεται περισσότερο από ποτέ επιτακτική η ανάγκη για τον περιορισμό της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρησιμοποίηση εξελιγμένων ενεργειακών μεθόδων και την εξέλιξη των εναλλακτικών καυσίμων και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

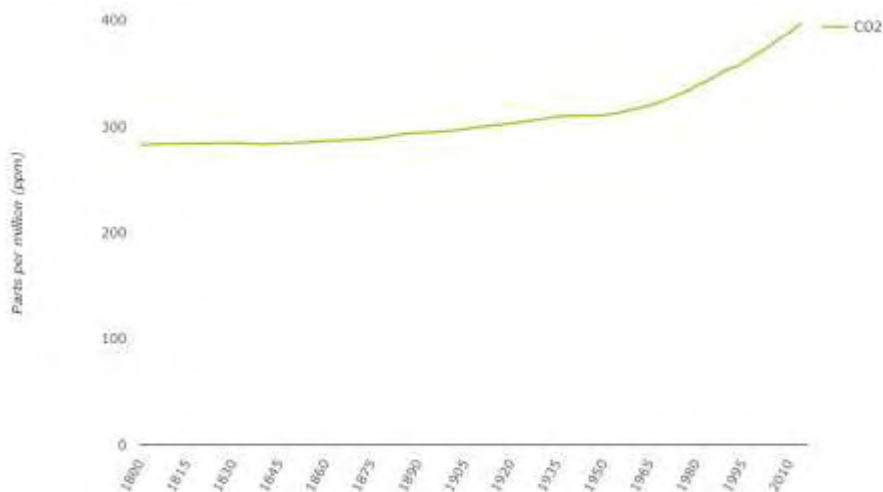


Διάγραμμα 4-3: Αέρια του θερμοκηπίου [70]

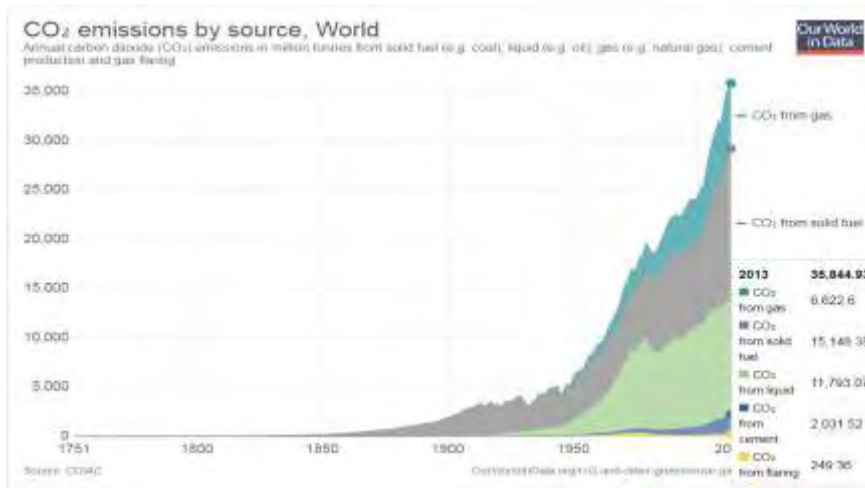


Διάγραμμα 4-4: Μεταβολή της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη ανά τα χρόνια [71]

Παρακάτω παρουσιάζεται ένα διάγραμμα της τάσης συγκέντρωσης CO₂ στην ατμόσφαιρα μέσα στα χρόνια (Διάγραμμα 4-5) και οι εκπομπές CO₂ σε million tonnes (Διάγραμμα 4-6). Παρά τις προσπάθειες που καταβάλλονται, παρουσιάζεται μια ανοδική πορεία τα τελευταία χρόνια, γεγονός που οφείλεται στον υπερπληθυσμό, την βιομηχανοποίηση και την έλλειψη περιβαλλοντικής συνείδησης. Η τσιμεντοβιομηχανία συγκεκριμένα παράγει πολύ μεγάλα ποσά CO₂, όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, και είναι μια από τις μεγαλύτερες πηγές, όσο αφορά τον τομέα των βιομηχανιών. Συνεπώς, θα πρέπει να εφαρμοστούν τρόποι και να ερευνηθούν καινούριοι για τον περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης της και των εκπομπών της.



Διάγραμμα 4-5: Τάση συγκέντρωσης CO₂ μέσα στο χρόνο [72]



Διάγραμμα 4-6: Η βαρύτητα σε εκπομπές CO₂ της τσιμεντοβιομηχανίας σε million tones [73]

Εδώ και πολλά χρόνια γίνονται έρευνες από εξειδικευμένους φορείς και εταιρείες με σκοπό την εύρεση ασφαλών ορίων συγκεντρώσεων των ατμοσφαιρικών ρύπων για την ανθρώπινη υγεία. Κλείνουμε αυτό το κεφάλαιο παραθέτοντας τα ευρωπαϊκά πρότυπα ποιότητας αέρα που ορίζονται από το *Ambient Air Quality Directive* για την προστασία της ανθρώπινης υγείας και οι οδηγίες της *WHO* στον Πίνακα 4-3 και Πίνακα 4-4.

Πίνακας 4-3: Ευρωπαϊκά πρότυπα ποιότητας αέρα [74]

Pollutant	Averaging period	Legal nature and concentration	Comments
PM ₁₀	1 day	Limit value: 50 µg/m ³	Not to be exceeded on more than 35 days per year
	Calendar year	Limit value: 40 µg/m ³	
PM _{2.5}	Calendar year	Limit value: 25 µg/m ³	
		Exposure concentration obligation: 20 µg/m ³	Average Exposure Indicator (AEI) (*) in 2015 (2013-2015 average)
		National Exposure reduction target: 0-20 % reduction in exposure	AEI (*) in 2020, the percentage reduction depends on the initial AEI
O ₃	Maximum daily 8-hour mean	Target value: 120 µg/m ³	Not to be exceeded on more than 25 days/year, averaged over 3 years (†)
	1 hour	Long term objective: 120 µg/m ³	
		Information threshold: 180 µg/m ³ Alert threshold: 240 µg/m ³	
NO ₂	1 hour	Limit value: 200 µg/m ³	Not to be exceeded on more than 18 hours per year
		Alert threshold: 400 µg/m ³	To be measured over 3 consecutive hours over 100 km ² or an entire zone
	Calendar year	Limit value: 40 µg/m ³	
BaP	Calendar year	Target value: 1 ng/m ³	Measured as content in PM ₁₀
SO ₂	1 hour	Limit value: 350 µg/m ³	Not to be exceeded on more than 24 hours per year
		Alert threshold: 500 µg/m ³	To be measured over 3 consecutive hours over 100 km ² or an entire zone
	1 day	Limit value: 125 µg/m ³	Not to be exceeded on more than 3 days per year
CO	Maximum daily 8-hour mean	Limit value: 10 mg/m ³	
C ₆ H ₆	Calendar year	Limit value: 5 µg/m ³	
Pb	Calendar year	Limit value: 0.5 µg/m ³	Measured as content in PM ₁₀
As	Calendar year	Target value: 6 ng/m ³	Measured as content in PM ₁₀
Cd	Calendar year	Target value: 5 ng/m ³	Measured as content in PM ₁₀
Ni	Calendar year	Target value: 20 ng/m ³	Measured as content in PM ₁₀

Notes: (*) AEI: based upon measurements in urban background locations established for this purpose by the MSs, assessed as a 3 year running annual mean.
(†) In the context of this report, only the maximum daily 8-hour means in 2015 are considered, so no average over 2013-2015 is presented.

Πίνακας 4-4: Air Quality Guidelines (AQG) and Reference Level (RL) [75]

Pollutant	Averaging period	AQG	RL	Comments
PM ₁₀	1 day	50 µg/m ³		99th percentile (3 days per year)
	Calendar year	20 µg/m ³		
PM _{2.5}	1 day	25 µg/m ³		99th percentile (3 days per year)
	Calendar year	10 µg/m ³		
O ₃	Maximum daily 8-hour mean	100 µg/m ³		
NO ₂	1 hour	200 µg/m ³		
	Calendar year	40 µg/m ³		
BaP	Calendar year		0.12 ng/m ³	
SO ₂	10 minutes	500 µg/m ³		
	1 day	20 µg/m ³		
CO	1 hour	30 mg/m ³		
	Maximum daily 8-hour mean	10 mg/m ³		
C ₆ H ₆	Calendar year		1.7 µg/m ³	
Pb	Calendar year	0.5 µg/m ³		
As	Calendar year		6.6 ng/m ³	
Cd	Calendar year	5 ng/m ³ (*)		
Ni	Calendar year		25 ng/m ³	

Notes: (*) As the WHO has not set an AQG for BaP, C₆H₆, As and Ni, the reference level was estimated assuming an acceptable risk of additional lifetime cancer risk of approximately 1 in 100 000.

(*) AQG set to prevent any further increase of Cd in agricultural soil, likely to increase the dietary intake of future generations.

Κεφάλαιο 5: Εναλλακτικά Καύσιμα

Η χρήση των εναλλακτικών καυσίμων στην τσιμεντοβιομηχανία αναγνωρίζεται ευρέως για τα περιβαλλοντικά οφέλη [76]. Τα εναλλακτικά καύσιμα αποδεσμεύουν την τσιμεντοβιομηχανία από την αποκλειστική εξάρτησή της από τα ορυκτά και δημιουργούν νέες προοπτικές για την ικανοποίηση των ενεργειακών τους αναγκών.

Τα πλεονεκτήματα από τη χρήση των εναλλακτικών καυσίμων είναι τα εξής [77]:

1. μείωση εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO₂)²,
2. μείωση του κόστους της παραγωγής του κλίνκερ εξαιτίας της χρήσης φτηνού καυσίμου,
3. εξοικονόμηση των ορυκτών καυσίμων και διατήρηση των αποθεμάτων τους,
4. υπεύθυνη χρήση των χρησιμοποιημένων υλικών-αποβλήτων,
5. καύση χωρίς υπόλοιπα καυσαερίων - εξαιτίας απώλειας στάχτης, χύματος και υδάτινων λυμάτων,
6. μη αισθητή διαφορά των αέριων εκπομπών,
7. καταστροφή των επικίνδυνων ουσιών μέσω της υψηλής θερμοκρασίας (long gas residue time), προϊόντων αλκαλικής καύσης (alcalic combustion material), αρχής της αντίθετης ροής (counter flow principle),
8. υψηλή θερμική απόδοση,
9. εναλλακτικός τρόπος διαχείρισης αποβλήτων που οδηγεί σε ενεργειακή ανάκτηση,
10. συμβολή στη διατήρηση της ισορροπίας του οικοσυστήματος με χρήση τη βιομάζας ως καύσιμο,
11. φθηνό κόστος παραγωγής τσιμέντου μέσω φθηνότερων εναλλακτικών καυσίμων.

Παραδοσιακά, τα παραπροϊόντα διάφορων βιομηχανιών, τα οποία μπορούν να αποτελέσουν εναλλακτικά καύσιμα, υφίστανται μία τελική επεξεργασία σε ειδικούς αποτεφρωτήρες, με ή χωρίς ενεργειακή ανάκτηση, προκειμένου να απελευθερωθούν στο περιβάλλον με μειωμένες περιβαλλοντολογικές συνέπειες.

Ωστόσο, μελέτες έχουν δείξει ότι η καύση των εναλλακτικών καυσίμων είναι εφικτή στους παραδοσιακούς κλίβανους της τσιμεντοβιομηχανίας, που έχουν σχεδιαστεί για ορυκτά καύσιμα. Μάλιστα προκύπτει το πλεονέκτημα εξοικονόμησης σε ενέργεια, σε πρώτες ύλες καθώς και μείωση κόστους [78]. Ακόμη, σε αντίθεση με τις εγκαταστάσεις αποτέφρωσης, οι κλίβανοι της τσιμεντοβιομηχανίας δεν απελευθερώνουν στην ατμόσφαιρα υπολείμματα στάχτης καθώς αυτά δεσμεύονται από το κλίνκερ και δεν προκύπτει η ανάγκη για περεταίρω επεξεργασία.

Στο παρακάτω διάγραμμα (Διάγραμμα 5-1) φαίνεται ποιες από τις πηγές των εναλλακτικών καυσίμων χρησιμοποιούνται πιο πολύ στην Ευρώπη και σε τι ποσοστό έναντι των ορυκτών καυσίμων και της βιομάζας.

² Το Πρωτόκολλο του Κιότο ήταν ένα επακόλουθο παράγωγο της UNFCCC. Αυτή η συμφωνία υιοθετήθηκε στο Κιότο της Ιαπωνίας, τον Δεκέμβριο 1997, και μέχρι τον Σεπτέμβριο 2000 είχε 84 προσχωρήσεις. Το Πρωτόκολλο του Κιότο δέσμευσε τα βιομηχανικά κράτη να μειώσουν τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου κατά 7% κάτω από τα επίπεδα του 1990 έως το 2008-2012. Υποθέτοντας μία κανονική οικονομική μεγέθυνση, η προβολή αυτού του μεγέθους είναι περίπου 20-30% κάτω από τα επίπεδα των εκπομπών οι οποίες διαφορετικά θα συνέβαιναν τότε. Για την επίτευξη των μειώσεων επιτρέπονται πολλές ενέργειες, συμπεριλαμβανομένου και του εμπορίου των εκπομπών. Οι ΗΠΑ και ένας αριθμός από άλλα κράτη δεν έχουν επικυρώσει αυτή τη συνθήκη· οι ΗΠΑ έχουν διασαφηνίσει ότι σημαντικές δεσμεύσεις για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου πρέπει επίσης να αναληφθούν και από τις αναπτυσσόμενες χώρες.



Διάγραμμα 5-1: Κατανομή των εναλλακτικών καυσίμων που χρησιμοποιούνται στην ευρωπαϊκή τσιμεντοβιομηχανία [79]

5.1 Επικίνδυνες εκπομπές εναλλακτικών καυσίμων

Σε καμία περίπτωση όμως δεν πρέπει να αγνοηθεί ότι η καύση των εναλλακτικών καυσίμων, ανεξαιρέτως τρόπου, έχει και αρνητικές συνέπειες, όπως επικίνδυνες εκπομπές στο περιβάλλον, που κάθε βιομηχανία καλείται να περιορίσει.

5.1.1 Χλώριο

Η παρουσία χλωρίου (chlorine) στα εναλλακτικά καύσιμα, για παράδειγμα στα δημοτικά στερεά απόβλητα, τη στάχτη από αποτέφρωση, βιομάζα και τα λοιπά, έχει άμεσες και έμμεσες συνέπειες στη λειτουργία των κλιβάνων και τις εκπομπές αυτών κατά την καύση. Για το λόγο αυτό, απαραίτητος καθίσταται ο έλεγχος του χλωρίου. Ακόμη και μικρή παρουσία χλωρίου στις πρώτες ύλες που προορίζονται για καύση οδηγούν στη δημιουργία τοξικών αερίων όπως το υδροχλώριο (HCl) και το υδροφθόριο (HF) [80]. Μίγματα χλωρίου μπορούν να δημιουργηθούν στις επιφάνειες των κλιβάνων και να προκαλέσουν διάβρωση [81], καθώς και την αύξηση της πηκτικότητας των βαρέων μετάλλων [82] με άμεσο αποτέλεσμα τη δημιουργία διοξινών. Αν παρατηρηθεί παρουσία χλωρίου στα καύσιμα σε ποσοστό που να πλησιάζει το 0,5% , είναι απαραίτητη η δημιουργία μιας παρακαμπτήριας διόδου-by-pass στη ροή των απαερίων για την μείωση του ποσοστού χλωρίου στο κλίνκερ [83] με επιπλέον ενεργειακές ανάγκες 20-25kJ/kg κλίνκερ [84].

5.1.2 Βαρέα μέταλλα

Έχει παρατηρηθεί ότι τα περισσότερα βαρέα μέταλλα που βρίσκονται στα υλικά που αποτελούν την πρώτη ύλη ή τα καύσιμα του συστήματος καμίνου ενσωματώνονται στο κλίνκερ ή δεσμεύονται από τις συσκευές ελέγχου εκπομπών [85]. Μία έρευνα που αναπτύχθηκε στο EPA έδειξε ότι εξετάζοντας την κινητικότητα των βαρέων μετάλλων στο κλίνκερ, όταν εκτίθεται σε όξινες συνθήκες, μόνο το κάδμιο (Cd) μπορεί να εντοπιστεί στο περιβάλλον και μάλιστα σε χαμηλότερα επίπεδα από τα επιτρεπόμενα, δηλαδή σε συγκέντρωση 5ppm [86]. Με την προϋπόθεση ότι οι κλίβανοι των εργοστασίων είναι σχεδιασμένοι βάσει υψηλών προδιαγραφών, δεν υπάρχει αισθητή διαφορά στις εκπομπές βαρέων μετάλλων καίγοντας γαιάνθρακα ή μίγμα γαιάνθρακα με εναλλακτικά καύσιμα [87]. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητη η εφαρμογή των BAT για τον έλεγχο των εκπομπών.

Ο υδράργυρος (Hg) και το κάδμιο (Cd) αποτελούν εξαίρεση όσον αφορά το γενικό τρόπο ελέγχου των βαρέων μετάλλων καθώς είναι πολύ πτητικά και περνάνε πολύ πιο εύκολα στα απαέρια. Η παρουσία χλωρίου κάνει αυτό το φαινόμενο πιο έντονο. Στις παραδοσιακές εγκαταστάσεις αποτέφρωσης, οι εκπομπές υδραργύρου και άλλων βαρέων μετάλλων ελέγχονται αποτελεσματικά από συνδυασμένη διάταξη πλυντρίδων και σακόφιλτρων. Αντίστοιχες τεχνικές δέσμευσης υδραργύρου βρίσκονται υπό ανάπτυξη για εφαρμογή τους στους κλιβάνους της τσιμεντοβιομηχανίας [88], διότι οι ήδη υπάρχουσες, ηλεκτροστατικά φίλτρα και σακόφιλτρα, δεσμεύουν μόνο το 25-50% του υδραργύρου [89]. Ο μόνος σίγουρος τρόπος για την αποφυγή εκπομπής μεγάλης ποσότητας των πτητικών αυτών ενώσεων είναι ο διαχωρισμός τους από τα καύσιμα και τις πρώτες ύλες πριν αυτά μπουν στον κλίβανο [90].

5.1.3 Διοξίνες και φουράνια

Οι διοξίνες (PCDDs) και τα φουράνια (PCDFs) είναι επικίνδυνοι για την υγεία αέριοι ρύποι, οι οποίοι σχηματίζονται κατά κόρον στα εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου και μπορούν να παραμείνουν για πολλά χρόνια στην ατμόσφαιρα. Οι συνθήκες για τη δημιουργία διοξινών γίνονται πιο ευνοϊκές με την παρουσία χλωρίου στο χώρο του κλιβάνου είτε αυτό προέρχεται από τα καύσιμα, είτε από τις πρώτες ύλες. Ωστόσο, οι πολύ υψηλές θερμοκρασίες και οι μεγάλοι χρόνοι παραμονής στον κλίβανο καταστέλλουν τη δημιουργία των διοξινών [91]. Μία ακόμη σημαντική τεχνική μείωσης του σχηματισμού των διοξινών είναι η μείωση των περιεχόμενων οργανικών ουσιών στις πρώτες ύλες όπως και η ταχεία ψύξη των καυσαερίων τόσο στους κλιβάνους υγρής όσο και της ξηρής διεργασίας [92]. Έρευνες έχουν δείξει ότι κλίβανοι με προθερμαντήρα και προασβεστοποιητή παρουσιάζουν ελαφρώς μειωμένες εκπομπές PCDDs και PCDFs [93].

5.2 Κατηγοριοποίηση εναλλακτικών καυσίμων

Οι κλίβανοι της τσιμεντοβιομηχανίας έχουν υψηλές ενεργειακές ανάγκες για την ανάπτυξη υψηλών θερμοκρασιών για να σχηματιστεί το κλίνκερ. Τα πιο κοινώς χρησιμοποιούμενα καύσιμα είναι ο γαιάνθρακας (coal), το πετρέλαιο (fuel oil), το πέτκοκ και το φυσικό αέριο [94]. Μία άλλη σημαντική πηγή ενέργειας για την τσιμεντοβιομηχανία είναι τα εναλλακτικά καύσιμα, όπως προαναφέρθηκε, τα οποία κατηγοριοποιούνται ανάλογα με την προέλευση τους στα [95]:

1. επικίνδυνα απόβλητα (hazardous wastes):
 - 1.1. επικίνδυνοι χρησιμοποιημένοι διαλύτες (spent solvents),
 - 1.2. βιομηχανικά έλαια και απόβλητα πετρελαίου (used oil),
 - 1.3. βιομηχανική λάσπη (industrial sludge),
2. μη επιβλαβή βιομηχανικά και εμπορικά απόβλητα (non-hazardous industrial and commercial wastes),
3. δημοτικά απόβλητα (municipal wastes):
 - 3.1. δημοτικά στερεά απόβλητα (municipal solid wastes),
 - 3.2. δημοτική ιλύς υπονόμων (municipal sewage sludge),
4. βιομάζα (biomass):
 - 4.1. βιομάζα και πράσινα απόβλητα (biomass and green wastes),
5. μη κατηγοριοποιημένα (other unclassified alternative fuels) :
 - 5.1. ζωικά άλευρα (animal meal),
 - 5.2. μπάζα κατεδαφίσεων (construction and demolition wastes),
 - 5.3. μεταχειρισμένα ελαστικά από ρόδες και άλλες πηγές (used tires and rubber waste).

5.2.1 Επικίνδυνοι χρησιμοποιημένοι διαλύτες

Ο τομέας των χρησιμοποιημένων διαλυτών χρήζει ενδιαφέροντος για τη διαδικασία παραγωγής κλίνκερ, καθώς έχουν παρόμοια φυσικο-χημικά χαρακτηριστικά με τα υγρά ορυκτά καύσιμα. Ωστόσο, οι διαθέσιμες ποσότητες πρέπει να είναι αρκετά σημαντικές ώστε να δικαιολογούνται τα κόστη διαχείρισής τους για την αποφυγή κινδύνων στην υγεία και την ασφάλεια. Η διαχείριση των διαλυτών χρειάζεται ειδικές μεθόδους, που συνήθως δεν είναι διαθέσιμες στις συνηθισμένες τσιμεντοβιομηχανίες και γι' αυτό συνήθως καλείται ως ειδική ομάδα.

Ένα εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου μπορεί να πετύχει ποσοστό αντικατάστασης με χρησιμοποιημένους διαλύτες έως και 100%, ενώ για σύστημα καμίνου που παράγει 500.000 τόνους τσιμέντου το χρόνο, μία αντικατάσταση του 20% της συνολικής της θερμικής απόδοσης σημαίνει τη χρησιμοποίηση 5.000 – 15.000 τόνους χρησιμοποιημένων διαλυτών το χρόνο, με θερμογόνο δύναμη περίπου 20 GJ ανά τόνο.

Η διαθεσιμότητα των χρησιμοποιημένων διαλυτών όλο και μειώνεται, αφού η βιομηχανία έχει αρχίσει να αντικαθιστά με επιτυχία τους διαλύτες με νερό. Η ποσότητα της προμήθειας των χρησιμοποιημένων διαλυτών έχουν να κάνουν κυρίως με την τιμή των καυσίμων.

Προέλευση

- Χημικές και φαρμακευτικές βιομηχανίες,
- βαφές και παραγωγή οικοδομικών υλικών,
- καθαριστικές δραστηριότητες σε εργαστήρια μετάλλου και συνεργεία,
- δραστηριότητες ανακύκλωσης.

Σύνθεση

- Χλώριο: 0% - 2%, μέση τιμή 0,6% με 1%,
- υγρασία: 0% - 25%,
- μεταλλικά στοιχεία: 1.000 με 5.000 ppm,
- κατώτατη θερμογόνο δύναμη (LCV): 20 – 28 GJ/ton.

Παραδοσιακές τεχνικές απόρριψης/χρήσης

- Ανάκτηση θερμότητας σε ειδικούς αποτεφρωτήρες ή σε τσιμεντοβιομηχανίες,
- ανακύκλωση σε εσωτερικά εργαστήρια ή σε ειδικευμένες δραστηριότητες.

Αλυσίδες τροφοδότησης

- Συλλογή και μεταφορά σε προσαρμοσμένες δεξαμενές ή σε βαρέλια για παραγωγή μικρού ή μεσαίου μεγέθους,
- η φύση του διαλύτη και οι κίνδυνοί του θα πρέπει να αναφέρονται σαφώς.

Τεχνολογίες προεπεξεργασίας και χρησιμοποίησης

- Μεταφορά από βαρέλια,
- ανάμειξη,
- διαχωρισμός φάσεων,
- ομογενοποίηση.

Κύριοι κίνδυνοι

- Χημική αντίδραση,
- δημιουργία στερεής φάσης,
- ανάμειξη χλωριούχων διαλυτών με μη χλωριούχων.

Αντιμετώπιση κινδύνων: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η υγεία και η ασφάλεια του λειτουργικού προσωπικού

- Συμμόρφωση με την περιβαλλοντική νομοθεσία,
- ασφαλής αποθήκευση: ατσάλι που είναι συμβατό με τα χαρακτηριστικά του διαλύτη και σύστημα πυρασφάλειας,
- συλλογή των πτητικών συστατικών,
- χρήση του εξοπλισμού ασφαλείας από όλο το προσωπικό.

Τεχνικά, πολιτειακά και οικονομικά εμπόδια

Τεχνικά εμπόδια:

- ποσότητα χλωρίου λόγω των παραδοσιακών χλωριούχων διαλυτών,
- μεγάλο εύρος σημείου σπίθας,
- κίνδυνος διαχωρισμού φάσεων κατά την αποθήκευση με μεγάλη διαφορά θερμογόνου δύναμης.

Άλλα εμπόδια:

- μεγάλες ποσότητες χρησιμοποιημένων διαλυτών είναι δυσεύρετες,
- αντίδραση του πληθυσμού κατά της καύσης διαλυτών,
- δίνεται προτεραιότητα στην ανακύκλωση,
- ανταγωνισμός με την αποτέφρωση.

Συνιστώμενες πολιτικές ενέργειες

- Απαγόρευση της απόθεσης στο φυσικό περιβάλλον,
- οικονομική βοήθεια (εξαίρεση από φόρους, επιδοτήσεις κλπ).

Έξοδα σύστασης και λειτουργικά έξοδα (CAPEX/OPEX)

- Ζώνη εκφόρτωσης των φορτηγών τσιμέντου για συλλογή των διαρροών,
- δεξαμενές ανάδευσης και λεκάνες συγκράτησης,
- σύστημα άντλησης για εκφόρτωση, ανάδευση και έγχυση,
- φίλτράρισμα από αυτοκαθαριζόμενο σύστημα στη ζώνη εκφόρτωσης,
- οι ηλεκτρικές συσκευές θα πρέπει να σχεδιαστούν με βάση το σημείο ανάφλεξης των διαλυτών (ATEX rules).

CAPEX: (5 - 10) * 1.000.000 €

OPEX : (10 - 20) * 1.000.000 €

Προοπτική μείωσης του CO₂

Συγκέντρωση βιομάζας = 0%

Πλήρης αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων

5.2.2 Βιομηχανικά έλαια και απόβλητα πετρελαίου

Ο τομέας των χρησιμοποιημένων λαδιών χρήζει ενδιαφέροντος για τη διαδικασία παραγωγής κλίνκερ, καθώς έχουν παρόμοια φυσικο-χημικά χαρακτηριστικά με τα υγρά ορυκτά καύσιμα. Τα έξοδα επένδυσης για αποθήκευση και χειρισμό τους είναι χαμηλά κι επομένως η χρήση τους μπορεί να είναι κερδοφόρα ακόμα και για μικρές ποσότητες.

Ένα εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου μπορεί να πετύχει ποσοστό αντικατάστασης με χρησιμοποιημένο λάδι έως και 100%. Για μία κάμινο που παράγει 500.000 τόνους τσιμέντου το χρόνο, μία αντικατάσταση του 15% της συνολικής της θερμικής απόδοσης σημαίνει τη χρησιμοποίηση 5.000 – 15.000 τόνους χρησιμοποιημένου λαδιού το χρόνο, με θερμογόνο δύναμη

(calorific value) περίπου 15 GJ/ton. Πολύ σημαντικός παράγοντας θεωρείται η δυσκολία μεταφοράς από την πηγή τους, αφού παρατηρείται μεγάλη γεωγραφική διασπορά αυτών των πηγών, καθώς και η τεχνική ανακύκλωσης του χρησιμοποιημένου λαδιού. Αναπτύσσεται όλο και περισσότερο και μπορεί να οδηγήσει στην ολική απορρόφησή του σε πολύ λίγα εργοστάσια ανακύκλωσης σε μία χώρα.

Τέλος, η προοπτική ενσωμάτωσης των χρησιμοποιημένων λαδιών ως εναλλακτικό καύσιμο στην τσιμεντοβιομηχανία μειώνεται ραγδαία, καθώς ο τομέας της ανακύκλωσης προτιμάται και έχει αρκετή χωρητικότητα.

Προέλευση

- Κάθε είδους μηχανή που χρειάζεται λίπανση (φορτηγά, γεννήτρια ισχύος κλπ),
- βιομηχανικές διεργασίες (παραγωγή ατσαλιού, ελαστικών, τροφής, λαδιού, κλπ).

Σύνθεση

- Χλώριο: 0-1% λόγω της πιθανής παρουσίας καθαριστικών διαλυτών,
- υγρασία: 0-20% που συνδέεται με τις συνθήκες αποθήκευσης,
- μεταλλικά στοιχεία: <1.000ppm,
- κατώτατη θερμογόνο δύναμη (LCV): 25-35 GJ/ton.

Κίνδυνοι ρύπανσης

- PCB,
- διαλύτες με χαμηλό σημείο σπίθας.

Παραδοσιακές τεχνικές απόρριψης/χρήσης

- Ανακύκλωση που περιορίζεται μόνο από το κόστος της (κατώτατο όριο για κέρδος > 100.000 τόνους το χρόνο),
- αποτέφρωση, συνοδευόμενη από ανάκτηση ενέργειας (κυρίως στις τσιμεντοβιομηχανίες).

Αλυσίδες τροφοδότησης

- Συλλογή από τα συνεργεία: θα πρέπει να γίνεται ανά τακτά χρονικά διαστήματα λόγω της περιορισμένης δυνατότητας αποθήκευσης στα γκαράζ,
- συλλογή λαδιών αρχικά σε μία κεντρική εγκατάσταση πριν τον τελικό τους προορισμό.

Τεχνολογίες προεπεξεργασίας και χρησιμοποίησης

Γίνονται στις κεντρικές εγκαταστάσεις συλλογής και μεταφοράς και περιλαμβάνουν τα παρακάτω:

- άδειασμα των βαρελιών,
- ανάμειξη διαφόρων αποβλήτων ελαίου,
- εξαγωγή του νερού μέσω μετάγγισης (decantation) ,φυσικής ή συντομότερης, χρησιμοποιώντας τασιενεργές/επιφανειοδραστικές ουσίες,
- έλεγχος για μόλυνση από PCB (με μικρά δοχεία για την αποφυγή της διάδοσης της μόλυνσης).

Αντιμετώπιση κινδύνων: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η υγεία και η ασφάλεια του λειτουργικού προσωπικού

- Ο εξοπλισμός και οι κανονισμοί πρέπει να είναι σύμφωνοι με τον κανονισμό που σχετίζεται με τη διαχείριση υδρογονανθράκων,
- αποφυγή διαρροών: τα δοχεία πρέπει να βρίσκονται πάνω από λεκάνες συγκράτησης, να υπάρχει σύστημα άντλησης που διαχειρίζεται τη συλλογή των διαρροών,
- πυρασφάλεια: προσαρμοσμένη στην αποθήκευση υδρογονανθράκων,
- διάφορα μέτρα ασφαλείας που σχετίζονται με διαλύτες με χαμηλό σημείο σπίθας.

Τεχνικά, πολιτειακά και οικονομικά εμπόδια

Τεχνικά εμπόδια:

- παρουσία χλωρίου και PCB από λάδια που προέρχονται από ηλεκτρικό εξοπλισμό (μετασχηματιστές ή συμπυκνωτές),
- ομοιογένεια: κίνδυνος διαχωρισμού του νερού κατά την αποθήκευση.

Οικονομικά εμπόδια:

- Κόστη συλλογής.

Πολιτειακά εμπόδια:

- επανάπλαση του ανταγωνισμού: ο τεχνική της ανακύκλωσης και της αξιοποίησης ενέργειας δεν έχουν τους ίδιους περιβαλλοντικούς νόμους,
- αντίδραση του πληθυσμού.

Συνιστώμενες πολιτικές ενέργειες

Εκτέλεση ενός κανονισμού που απαγορεύει:

- την απόρριψη χρησιμοποιημένων ελαίων σε υπονόμους,
- την παράνομη καύση των χρησιμοποιημένων λαδιών.

Έξοδα σύστασης και λειτουργικά έξοδα (CAPEX/OPEX)

- Ζώνη εκφόρτωσης των φορτηγών τσιμέντου για συλλογή των διαρροών,
- δεξαμενές ανάδευσης και λεκάνες συγκράτησης,
- σύστημα άντλησης για εκφόρτωση, ανάδευση και έγχυση,
- φιλτράρισμα από αυτοκαθαριζόμενο σύστημα στη ζώνη εκφόρτωσης,
- ηλεκτρικές συσκευές.

CAPEX: (1 - 3) * 1.000.000 €

OPEX : 5-10 € ανά τόνο

Προοπτική μείωσης του CO₂

- Συγκέντρωση βιομάζας = 0%,
- πλήρης αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων.

5.2.3 Υδατικά λύματα

Τα υδατικά λύματα παρουσιάζουν ενδιαφέρον για την τσιμεντοβιομηχανία, αλλά για περιορισμένη χρήση και εφόσον προέρχονται από γειτονικές πηγές. Μία μικρή κεφαλαιουχική δαπάνη είναι ικανή να εξασφαλίσει ρυθμό εισαγωγής 1 με 2 τόνους λύματα την ώρα. Επιπλέον, πρέπει να κατοχυρωθεί έλεγχος ποιότητας. Το προνόμιο χρήσης των υδατικών λυμάτων στην τσιμεντοβιομηχανία είναι η μείωση των εκπομπών οξειδίων του αζώτου (NOx). Έτσι, για να προχωρήσει ένα εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου στη χρήση υδατικών λυμάτων πρέπει να αποζημιώνεται οικονομικά, π.χ. με ελάφρυνση περιβαλλοντικών φόρων.

Προέλευση

- Χημικές και φαρμακο-παρασκευαστικές διαδικασίες,
- εργαστήρια που διαχειρίζονται μέταλλα,
- οδοί και λιώσιμο πάγου από τα αεροδρόμια,
- βιομηχανικές δραστηριότητες καθαρισμού.

Σύνθεση

- Χλώριο < 0,5%,
- υγρασία > 80%,
- μεταλλικά στοιχεία: 1.000 – 2.000 ppm,

- κίνδυνοι μόλυνσης: χημικά, τασιενεργές ουσίες, διαλύτες, λάδια,
- κατώτατη θερμογόνος δύναμη (LCV): 0 GJ/ton.

Παραδοσιακές τεχνικές απόρριψης/χρήσης

- Αποχετεύσεις και βιολογικός καθαρισμός,
- φυσικοχημική εξυγίανση,
- αποτέφρωση.

Αλυσίδες τροφοδότησης

Τα υδατικά λύματα που χαρακτηρίζονται ως επικίνδυνα απόβλητα και μπορεί να είναι εύφλεκτα ή να περιέχουν επιβλαβείς ουσίες, απαιτείται να μεταφέρονται από ειδικευμένες εταιρείες

Τεχνολογίες προεπεξεργασίας και χρησιμοποίησης

- Ανάμειξη,
- διαχωρισμός φάσεων,
- ομογενοποίηση.

Κύριοι κίνδυνοι

- Χημική αντίδραση,
- στερεοποίηση,
- ανάμειξη χλωριούχων διαλυτών με μη χλωριούχων.

Αντιμετώπιση κινδύνων: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η υγεία και η ασφάλεια του λειτουργικού προσωπικού

Ο εξοπλισμός και οι κανονισμοί πρέπει να συμμορφώνονται με τον κανονισμό για τη διαχείριση διαλυτών και αφορούν την μεταφορά και την αποθήκευση.

Μεταφορά:

- χειρισμός βαρελιών: σύστημα εξυγίανσης πτητικών οργανικών ουσιών στα κτίρια και κατάλληλος εξοπλισμός για το ανθρώπινο δυναμικό.

Αποθήκευση:

- ατσάλινα δοχεία αποθήκευσης για αλκαλικά και όξινα περιεχόμενα,
- πυρασφάλεια,
- συστήματα άντλησης για διαχείριση των διαρροών.

Τεχνικά, πολιτειακά και οικονομικά εμπόδια

Τεχνικά εμπόδια:

- χλώριο: πιθανή παρουσία αλάτων,
 - σημείο στίθας: πιθανή παρουσία ιχθών διαλυτών,
 - απουσία ομογενοποίησης όσο αφορά τη θερμογόνο δύναμη: πιθανή διαφορά φάσεων των διαλυτών,
 - κίνδυνος προσπέρασης του ορίου απαγωγής ατμών των ανεμιστήρων
- Λύση:** εισαγωγή των υδατικών λυμάτων στον ψύκτη του κλίνκερ (clinker cooler)

Πολιτειακά εμπόδια:

- περίπλοκοι κανόνες για τη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων και πιθανή αντίδραση των πολιτών.

Συνιστώμενες πολιτικές ενέργειες

Κανονισμός που απαγορεύει και ελέγχει την απόρριψη των υδατικών λυμάτων στα ποτάμια.

Έξοδα σύστασης και λειτουργικά έξοδα (CAPEX/OPEX)

- Ζώνη εκφόρτωσης των φορτηγών τσιμέντου για συλλογή των διαρροών,

- δεξαμενές ανάδευσης και λεκάνες συγκράτησης,
- σύστημα άντλησης για εκφόρτωση, ανάδευση και έγχυση,
- φιλτράρισμα από αυτοκαθαριζόμενο σύστημα στη ζώνη εκφόρτωσης,
- οι ηλεκτρικές συσκευές θα πρέπει να σχεδιαστούν με βάση το σημείο ανάφλεξης των διαλυτών (ATEX rules).

CAPEX: $(1 - 3) * 1.000.000$ € ανάλογα με το σημείο φλόγας και το μέγεθος

OPEX : $(5 - 10) * 1.000.000$ € ανά τόνο

Προοπτική μείωσης του CO₂

- Συγκέντρωση βιομάζας = 0%,
- μείωση της παραγωγής οξειδίων του αζώτου,
- πλήρης αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων.

5.2.4 Ελαστικά από ρόδες και άλλες πηγές

Η τσιμεντοβιομηχανία είναι ίσως ο καλύτερος τομέας για την κατάληξη των μεταχειρισμένων ελαστικών, καθώς έχουν υψηλή και αξιόπιστη θερμογόνο δύναμη. Επίσης, τα πιθανά οξείδια ατσαλιού και σιδήρου που περιέχουν, απορροφούνται κατά τη διαδικασία παραγωγής κλίνκερ. Τέλος, μειώνουν τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου από την καμινάδα.

Το σημαντικό στάδιο είναι η συλλογή των ελαστικών, καθώς η πηγές τους μπορεί να βρίσκονται σε διαφορετικές τοποθεσίες. Ένα εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου έχει τη δυνατότητα να κάψει ολόκληρες τις ρόδες ή και κονιορτοποιημένα ελαστικά. Σημαντικός αντίπαλος είναι οι υπόλοιποι τομείς που μπορεί να χρησιμοποιούν χρησιμοποιημένα ελαστικά. Λόγω της ανάπτυξης κι άλλων τεχνικών, η χρησιμοποίηση παλιών ελαστικών γίνεται οικονομικά ασύμφορη. Για εργοστάσια με προασβεστοποιητή ή προθερμαντήρα μπορεί να αντικατασταθεί μέχρι και το 20% των ενεργειακών τους αναγκών από παλιά ελαστικά, ενώ για μία κάμινο που παράγει 500.000 τόνους κλίνκερ το χρόνο, σημαίνει την ανάγκη χρήσης 12.000 τόνων παλιών λάστιχων το χρόνο.

Προέλευση

- Ελαστικά αυτοκινήτου: Παραγωγή και αντικατάσταση ελαστικών,
- ελαστικά απόβλητα από τις εγκαταστάσεις ανακύκλωσης ελαστικών (ελαστικά σε λωρίδες),
- άλλα ελαστικά απόβλητα: από σόλες παπουτσιών, ζώνες μεταφοράς κλπ.

Σύνθεση

- Χλώριο: < 0,1%,
- Θείο: περίπου 1,5%,
- Υγρασία: 0%. Δεν πρέπει να αγνοηθεί η πιθανότητα συσσώρευσης νερού κατά την αποθήκευση,
- μεταλλικά στοιχεία: σίδηρο: 10 – 15%, ψευδάργυρος: 1 – 2%, άλλα: 1.000 με 2.000 ppm,
- κατώτατη θερμογόνο δύναμη (LCV): 26 – 28 GJ/ton (23 – 26 GJ/ton λάστιχων φορτηγών).

Παραδοσιακές τεχνικές απόρριψης/χρήσης

- Αναγόμευση: 10% στις αναπτυγμένες χώρες, κοντά στο 0% στις αναπτυσσόμενες χώρες,
- ανάκτηση υλικού: χρήση σε πολιτειακές εργασίες ή ανακύκλωση,
- ανάκτηση ενέργειας: κυρίως στην τσιμεντοβιομηχανία.

Αλυσίδες τροφοδότησης

Η συλλογή είναι το πιο κρίσιμο ζήτημα λόγω των μικρών διασκορπισμένων ποσοτήτων που βρίσκονται σε γκαράζ, πωλητές ελαστικών, ή από εταιρείες που δουλεύουν με στόλους οχημάτων.

Πολλές χώρες έχουν τεράστιες σωρούς παλιών ελαστικών που μένουν αναξιοποίητες.

Τεχνολογίες προεπεξεργασίας και χρησιμοποίησης

- Τεμαχισμός,
- για ελαστικά μεγαλύτερου μεγέθους γίνεται διαχωρισμός του μεταλλικού μέρους.

Αντιμετώπιση κινδύνων: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η υγεία και η ασφάλεια του λειτουργικού προσωπικού

Ο εξοπλισμός και οι διαδικασίες πρέπει να είναι συμβατές με την περιβαλλοντική νομοθεσία που σχετίζεται με τα παλιά λάστιχα.

Κίνδυνοι

- Κίνδυνοι που σχετίζονται με την υγεία: παρουσία κουνουπιών (στις τροπικές χώρες) λόγω της παγίδευσης του νερού,
- κίνδυνος φωτιάς: προτείνεται η δημιουργία πολλών μικρών στίβων αντί μίας μεγάλης και η χρησιμοποίηση άμμου για να μπλοκάρει τη πιθανή φλόγα.

Τεχνικά, πολιτειακά και οικονομικά εμπόδια

Τεχνικά εμπόδια:

- θείο: περιορισμένη περιεκτικότητα,
- διαχείριση ολόκληρων ελαστικών: για την εισαγωγή και την ποιότητα καύσης.

Οικονομικά εμπόδια:

- ανταγωνισμός με άλλες επιχειρήσεις που χρησιμοποιούν τα ελαστικά σαν καύσιμο.

Πολιτειακά εμπόδια:

- αντίδραση των πολιτών κατά της καύση ελαστικών.

Συνιστώμενες πολιτικές ενέργειες

- Απαγόρευση της υγειονομικής ταφής των ελαστικών,
- έμπρακτη ενθάρρυνση για την ανάκτηση των μεταλλικών στοιχείων.

Έξοδα σύστασης και λειτουργικά έξοδα (CAPEX/OPEX)

Τομέας τεμαχισμού:

CAPEX: 1.000.000 €

OPEX: (15 – 40) * 1.000.000 € ανά τόνο

Εργοστάσιο τσιμέντου:

CAPEX: 1.000.000 με 3.000.000 €

OPEX: (5 – 10) * 1.000.000 €

Προοπτική μείωσης του CO₂

- Συγκέντρωση βιομάζας = 25 – 30%,
- πλήρης αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων.

5.2.5 Βιομηχανική λάσπη

Η βιομηχανική λάσπη (industrial sludge) είναι ένα περίπλοκο ζήτημα για τους παραγωγούς της. Συνήθως χρησιμοποιούνται προσωρινές λιμνοθάλασσες για την απόρριψή της. Μπορεί να υπάρξει σε υγρή, στεγνή ή ενδιάμεση μορφή. Η τεχνική εξέλιξη των αντλιών βοηθά στη μεταφορά τους σε κάθε μορφή και τέλος έχει χαμηλή θερμογόνο δύναμη.

Προέλευση

- Βιομηχανίες. Υπάρχουν δύο είδη λάσπης: βιολογική και φυσικοχημική,

- καθαρισμό δεξαμενών, σωληνώσεων και καναλιών (πχ υπονόμους),
- ενέργειες αποκατάστασης παλιών λιμνοθαλασσών.

Σύνθεση

Η σύνθεση της λάσπης μπορεί να διαφέρει ανάλογα με τη διαδικασία αποκατάστασής της. Παράδειγμα, για τη λάσπη που προέρχεται από το πετρέλαιο η σύσταση είναι:

- χλώριο: 0 – 0,5%,
- υγρασία: 1.000 – 3.000 ppm,
- μεταλλικά στοιχεία: <1.000 ppm,
- στάχτη: 10 – 50%,
- κατώτατη θερμογόνος δύναμη (LCV): 5 – 15 GJ/ton.

Παραδοσιακές τεχνικές απόρριψης/χρήσης

- Απόρριψη της ανόργανης λάσπης σε εκτάσεις γης, σύμφωνα με τον κανονισμό για τη συγκέντρωση ρύπων,
- υγειονομική ταφή για λάσπη με χαμηλή υγρασία,
- αποτέφρωση.

Αλυσίδες τροφοδότησης

Με συμβατικά φορτηγά. Αν χρησιμοποιούνται τρέιλερ, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος διαρροών.

Τεχνολογίες προεπεξεργασίας και χρησιμοποίησης

- Μηχανική αφύγρανση στις μονάδες υπονόμων,
- Θερμική αφύγρανση στη μονάδα αποχέτευσης ή στο εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου με χρήση της θερμότητας των απαερίων καύσης.

Με την ανάμειξη με απορροφητικά μέσα παράγεται ένα είδος στερεού εναλλακτικού καυσίμου:

- για την οργανική λάσπη χρησιμοποιείται συνήθως πριονίδι,
- για τη λάσπη πετρελαίου χρησιμοποιείται συνήθως άσβεστος ή ασβεστόλιθος.

Αντιμετώπιση κινδύνων: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η υγεία και η ασφάλεια του λειτουργικού προσωπικού

Ο εξοπλισμός και οι διαδικασίες πρέπει να συμφωνούν με την περιβαλλοντική νομοθεσία που σχετίζεται με τη λάσπη και σε μερικές περιπτώσεις με επιβλαβείς ουσίες.

Οι κύριοι κίνδυνοι είναι:

- οι οσμές από τη βιολογική λάσπη,
- η τοπική μόλυνση από σκόνη που δημιουργείται από τη διαδικασία παραγωγής του καυσίμου,
- κάθε επικίνδυνο χημικό συστατικό το οποίο μπορεί να περιέχεται στη λάσπη.

Πρόληψη: ειδικός προστατευτικός εξοπλισμός για το προσωπικό

Τεχνικά, πολιτειακά και οικονομικά εμπόδια

Τεχνικά εμπόδια:

- έλλειψη ομοιομορφίας όσο αφορά τη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου και την περιεκτικότητα σε σκόνη,
- μεταβλητότητα του ιξώδους.

Οικονομικά εμπόδια:

- ανταγωνισμός με άλλες επιχειρήσεις που χρησιμοποιούν τη λάσπη,
- το κόστος των απορροφητικών μέσων που μπορεί να κάνει πολύ κοστοβόρα τη διαδικασία παραγωγής του καυσίμου, κυρίως στην περίπτωση που χρειάζεται πριονίδι.

Πολιτειακά εμπόδια:

- πιθανή αντίδραση του πληθυσμού.

Συνιστώμενες πολιτικές ενέργειες

Νομοθεσία για την υγειονομική ταφή:

- ξεκάθαρη νομοθεσία και αντίστοιχος έλεγχος,
- ξεκάθαρη νομοθεσία για την επιτόπου επεξεργασία.

Έξοδα σύστασης και λειτουργικά έξοδα (CAPEX/OPEX)

Στην περίπτωση εισαγωγής παστοειδούς λάσπης χρειάζονται:

- αναχώματα εκφόρτωσης,
- χοάνες τροφοδοσίας,
- αντλίες τιμέντου,
- σωληνώσεις υψηλής πίεσης για τη γραμμή τροφοδοσίας,
- ειδικός καυστήρας.

CAPEX: 1 – 3 εκατομμύρια €

OPEX : 10 - 20€ ανά τόνο

Στην περίπτωση εισαγωγής ξηρής λάσπης χρειάζονται:

- ζώνη εκφόρτωσης για τα φορτηγά,
- κάθετα συλώ με ειδική αντιακρηκτική προστασία,
- σύστημα πνευματικής εισαγωγής.

CAPEX: 1.000.000 €

OPEX : 5 - 10€ ανά τόνο

Προοπτική μείωσης του CO₂

- Συγκέντρωση βιομάζας που ποικίλει,
- πλήρης αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων.

5.2.6 Μη επιβλαβή βιομηχανικά απόβλητα

Αυτός ο τομέας χρήζει ενδιαφέροντος για την τσιμεντοβιομηχανία, επειδή μπορεί να εγγραφεί συνεχόμενες, ικανοποιητικές ποσότητες και καλής ποιότητας. Είναι απαραίτητο ένα βήμα προετοιμασίας, κατά το οποίο απαιτείται μία γραμμή τεμαχισμού που θα βοηθήσει αρκετά την αφύγρυνση, αυτές οι επενδύσεις μπορούν να χωριστούν ανάμεσα στις δύο βιομηχανίες.

Οι βιομηχανικές διεργασίες ανακύκλωσης παράγουν απόβλητα που μπορούν να ενταχθούν σε αυτόν τον τομέα. Για παράδειγμα, η βιομηχανία χαρτιού θα μπορούσε να συνεργαστεί αποδοτικά με την τσιμεντοβιομηχανία.

Τα απόβλητα από τις εργοστασιακές συσκευασίες, π.χ. τα χαρτόκουτα, είναι πολύ πιο ποιοτικά, όσο αφορά τη θερμογόνο δύναμη, τη περιεκτικότητα υγρασίας και χλωρίου, από τα αντίστοιχα δημοτικά. Το αρνητικό είναι ότι τα υψηλότερης ποιότητας απόβλητα είναι περιζήτητα και από τα εργοστάσια ανακύκλωσης, που είναι ο κύριος ανταγωνιστής της τσιμεντοβιομηχανίας.

Οι συσκευασίες που είναι μολυσμένες από την πρώτη ύλη που περιέχουν αποτελούν ενδιαφέρουσα πηγή για την τσιμεντοβιομηχανία. Τέτοια παραδείγματα είναι οι συσκευασίες χημικών, πετρελαιοειδών και λιπάσματος. Η ανακύκλωση των παραπάνω δε βρίσκει πρακτική εφαρμογή. Για τον τεμαχισμό τους απαιτείται εξοπλισμός που είναι ικανός να διαχειρίζεται πιθανούς διαλύτες με χαμηλό σημείο σπίθας, καθώς και μέτρα ασφαλείας σε περίπτωση φωτιάς ή εκρήξεως. Η τσιμεντοβιομηχανία θα πρέπει να αδειοδοτηθεί με για τη διαχείριση επικίνδυνων αποβλήτων.

Προέλευση

- Απόβλητα συσκευασιών,
- απόβλητα που δημιουργούνται από διάφορες βιομηχανικές διεργασίες όπως τα απόβλητα του πολτοποιητή ενός εργοστασίου ανακύκλωσης χαρτιού,
- προϊόντα που δεν ικανοποιούν τις προδιαγραφές τους,
- ειδική κατηγορία: οι συσκευασίες που είναι μολυσμένες από χημικά.

Σύνθεση

Κύρια εργοστασιακά απόβλητα:

- χλώριο: 0 – 2%,
- υγρασία: 10 – 20%,
- μεταλλικά στοιχεία: 1.000 – 3.000 ppm.

Απόβλητα από πολτοποίηση

- χλώριο: 0,5%,
- υγρασία: 40 – 60%,
- κατώτατη θερμογόνος δύναμη (LCV): 6 – 12 GJ/ton (20 – 25 GJ/ton μετά την αφύγρανση).

Παραδοσιακές τεχνικές απόρριψης/χρήσης

- ανακύκλωση: είναι ο κύριος προορισμός αυτών των αποβλήτων,
- αποτέφρωση: με ή χωρίς ενεργειακή ανάκτηση,
- υγειονομική ταφή: από τις εταιρείες παραγωγούς των αποβλήτων ή εξωτερικές εγκαταστάσεις.

Αλυσίδες τροφοδότησης

Ανάλογα με τον τύπο συλλογής:

- επιλεκτική συλλογή: διαχωρισμός των ανακυκλώσιμων από τα απόβλητα, ταξινόμηση των αποβλήτων,
- μη επιλεκτική συλλογή με σταθμούς μεταφοράς (κυρίως για τις μικρομεσαίες επιχειρήσεις).

Τεχνολογίες προεπεξεργασίας και χρησιμοποίησης

Προετοιμασία του SRF/RDF σε ειδικές εγκαταστάσεις που σέβονται τη σχετική νομοθεσία με τη διαχείριση αποβλήτων:

- λειτουργία ταξινόμησης,
- αφύγρανση των αποβλήτων.

Αντιμέτωπιση κινδύνων: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η υγεία και η ασφάλεια του λειτουργικού προσωπικού

Ο εξοπλισμός και οι δραστηριότητες θα πρέπει να συμμορφώνονται με την ευρωπαϊκή νομοθεσία για τα απόβλητα του δήμου.

Οι κύριοι κίνδυνοι που σχετίζονται με τα SRF/RDF είναι:

- φωτιά που μπορεί να προκληθεί από την άλεση: χρειάζεται εξοπλισμός εντοπισμού φωτιάς,
- έκρηξη σκόνης: λύνεται με διαδικασίες καθαρισμού.

Τεχνικά, πολιτειακά και οικονομικά εμπόδια

Τεχνικά εμπόδια:

- υγρασία και θερμογόνος δύναμη,
- χλώριο,
- μέγεθος σωματιδίων,
- ομογένεια.

Οικονομικά εμπόδια:

- ανταγωνισμός με την υγειονομική ταφή,
 - ανταγωνισμός με την αποτέφρωση.
- Πολιτειακά εμπόδια:
- αντίδραση του πληθυσμού.

Συνιστώμενες πολιτικές ενέργειες

- Εφαρμογή νομοθεσίας που περιορίζει την υγειονομική ταφή με κάποιο όριο ή φορολογία,
- απαγόρευση της ανάμειξης μολυσμένων συσκευασιών με μη.

Έξοδα σύστασης και λειτουργικά έξοδα (CAPEX/OPEX)

Δραστηριότητες τεμαχισμού:

- γραμμή τεμαχισμού ενός βήματος (κοκκομετρία = 50 – 80mm):

CAPEX: $(0,5 - 1) * 1.000.000 \text{ €}$

OPEX : 15 – 25€ ανά τόνο

- Γραμμή τεμαχισμού δύο βημάτων (κοκκομετρία = 20 – 35mm):

CAPEX: $(1 - 2) * 1.000.000 \text{ €}$

OPEX : 20 – 40€ ανά τόνο, συν το κόστος της χημικής διαχείρισης για τις μολυσμένες συσκευασίες.

Για την τσιμεντοβιομηχανία:

- για μικρές ποσότητες (1 – 5 τόνους την ώρα):

CAPEX: $(1 - 2) * 1.000.000 \text{ €}$

OPEX : 5 – 10 € ανά τόνο

- για μεγαλύτερες ποσότητες (> 5 τόνους την ώρα):

CAPEX: $(5 - 15) * 1.000.000 \text{ €}$

OPEX : 5 – 10€ ανά τόνο

Προοπτική μείωσης του CO₂

- Συγκέντρωση βιομάζας = 25 – 30%,
- πλήρης αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων.

5.2.7 Δημοτικά στερεά απόβλητα

Είναι ένας πολλά υποσχόμενος τομέας για την τσιμεντοβιομηχανία. Τα δημοτικά απόβλητα παράγονται παντού σε μεγάλες ποσότητες. Η υγειονομική ταφή φθίνει όλο και περισσότερο σαν επιλογή λόγω της εντατικοποίησης των νόμων. Πρέπει να υποστούν προεπεξεργασία για να παράγουν ένα κατάλληλο εναλλακτικό καύσιμο (ή RDF). Το αποτέλεσμα της προεπεξεργασίας μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην είσοδο του προασβεστοποιητή. Λόγω του υψηλού κόστους της κατεργασίας των αποβλήτων προκειμένου να γίνουν καύσιμο συμβατό με τον κύριο καυστήρα, δεν παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ως καύσιμο κύριου καυστήρα. Ένας τρόπος για να γίνει πιο ελκυστική η χρήση τους είναι να χρησιμοποιηθεί η χαμένη θερμότητα των απαερίων της παραγωγής τσιμέντου για την αφύγρανση των εναλλακτικών καυσίμων. Για τη χρήση RDF που παράγεται από δημοτικά στερεά απόβλητα προαπαιτείται η ενσωμάτωση της βιομηχανίας στην τοπική κοινωνία.

Προέλευση

Παράγονται από τους πολίτες από οικιακές δραστηριότητες.

Σύνθεση

Ποικίλει ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή από όπου συλλέγονται, την εποχή και την εταιρεία που τα συλλέγει.

Τυπική σύνθεση:

- χλώριο: 0,5 – 1,5%,

- υγρασία: 30 – 45%,
- μεταλλικά στοιχεία: 2.000 – 5.000 ppm,
- κατώτατη θερμογόνος δύναμη (LCV): 8 – 10 GJ/ton.

SRF/RDF:

- ποιότητα για τον κύριο καυστήρα,
- LCV: 20 – 25 GJ/ton,
- υγρασία: < 15%,
- κοκκομετρία: 20 – 30 mm.

Ποιότητα για προασβεστοποιητή:

- LCV: 13 – 15 GJ/ton,
- υγρασία: 15 – 25%,
- κοκκομετρία: 50 – 80 mm.

Ποιότητα για το θάλαμω προ της καύσης:

- LCV: 10 – 13 GJ/ton,
- υγρασία: 20 – 40%,
- κοκκομετρία: 100 – 200 mm.

Παραδοσιακές τεχνικές απόρριψης/χρήσης

- Υγειονομική ταφή
- αποτέφρωση,
- ανακύκλωση που όλο και αναπτύσσεται σύμφωνα με τη νομοθεσία που αποσκοπεί στην κυκλική οικονομία.

Αλυσίδες τροφοδότησης

- Επιλεκτική συλλογή: διαχωρισμός των ανακυκλώσιμων από τα απόβλητα, ταξινόμηση των αποβλήτων,
- μη επιλεκτική συλλογή με σταθμούς μεταφοράς μέσα στις πόλεις.

Πολύ σημαντικό είναι οι πολίτες να αποκτήσουν περιβαλλοντική συνείδηση.

Τεχνολογίες προεπεξεργασίας και χρησιμοποίησης

- Γραμμές ταξινόμησης αφιερωμένες για τον τεμαχισμό: απομάκρυνση των ανακυκλώσιμων και των οργανικών κομματιών και τεμαχισμός των εύφλεκτων υλικών
- μηχανική βιολογική μεταχείριση: παραγωγή SRF/RDF που σχετίζεται με την παραγωγή κοπριάς,
- αφύγρανση (βιολογική ή θερμική): κύριο σημείο για την παραγωγή ενός βιολογικού καυσίμου κατάλληλου για την τσιμεντοβιομηχανία.

Αντιμετώπιση κινδύνων: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η υγεία και η ασφάλεια του λειτουργικού προσωπικού

Ο εξοπλισμός και η διαδικασίες θα πρέπει να είναι συμβατές με την περιβαλλοντική νομοθεσία που σχετίζεται με τα δημοτικά απόβλητα.

Οι κύριοι κίνδυνοι είναι:

- φωτιά που μπορεί να προκληθεί από την άλεση: χρειάζεται εξοπλισμός εντοπισμού φωτιάς,
- έκρηξη σκόνης: λύνεται με διαδικασίες καθαρισμού.

Τεχνικά, πολιτειακά και οικονομικά εμπόδια

Τεχνικά εμπόδια:

- χαμηλή κατώτατη θερμογόνος δύναμη (LCV) και υψηλή υγρασία (στην τσιμεντοβιομηχανία μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο στον ασβεστοποιητή),
- κλώριο: που πηγάει από τα PVC και το αλάτι από τις τροφές.

Οικονομικά εμπόδια:

- ανταγωνισμός με την υγειονομική ταφή,
- ανταγωνισμός με την αποτέφρωση.

Πολιτειακά εμπόδια:

- αντίδραση του πληθυσμού.

Έξοδα σύστασης και λειτουργικά έξοδα (CAPEX/OPEX)

Για μια γραμμή ταξινόμησης χωρητικότητας 250.000 τόνους το χρόνο:

CAPEX: $(1 - 2) * 1.000.000 \text{ €} + (7 - 8) * 1.000.000 \text{ €}$ για τη βιολογική επεξεργασία,

OPEX: 5 – 15€ ανά τόνο ανάλογα με το ποσοστό των ανακυκλώσιμων και τις τιμές της αγοράς.

Για τη γραμμή τεμαχισμού και την τσιμεντοβιομηχανία: τα ίδια έξοδα με τα «μη επιβλαβή εργοστασιακά απόβλητα

Προοπτική μείωσης του CO₂

- Μετά την προεπεξεργασία, συγκέντρωση βιομάζας = 35 – 45%,
- πλήρης αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων

5.2.8 Δημοτική ιλύς υπονόμων

Η αποξηραμένη λάσπη υπονόμου παρουσιάζει ενδιαφέρον για την τσιμεντοβιομηχανία. Οι ποσότητες που παράγονται είναι ικανοποιητικές και μη διακοπτόμενες. Η αξιοποίηση της δημόσια λάσπης υπονόμων από την τσιμεντοβιομηχανία μπορεί να θεωρηθεί σαν υπηρεσία στην κοινωνία αν λάβει κανείς υπόψη του την υψηλή υγρασία της και τη χαμηλή θερμογόνο δύναμή της.

Προέλευση

- Μονάδες επεξεργασίας αστικών λυμάτων που μπορεί να επεξεργάζονται αστικά ή βιομηχανικά λύματα.

Τα υδατικά λύματα υπόκεινται βιολογικό καθαρισμό. Η μόλυνση συγκεντρώνεται στη λάσπη.

Μετά τον βιολογικό καθαρισμό, η λάσπη αφυγρύνεται με μηχανικό τρόπο (με φυγοκέντρωση ή φίλτρα) ή θερμικό τρόπο.

Σύνθεση

Εξαρτάται από τη διαδικασία αφύγρανσης:

- χλώριο: 0,5 – 1%,
- υγρασία: 40 – 60% αρχικά και 5 – 20% μετά την αφύγρανση,
- μεταλλικά στοιχεία: 1.000 – 5.000 ppm, κυρίως από αλουμίνιο και σίδηρο,
- κατώτατη θερμογόνο δύναμη (LCV): 2 – 3 GJ/ton και 10 - 15 GJ/ton μετά την αφύγρανση.

Παραδοσιακές τεχνικές απόρριψης/χρήσης

Απορρίπτεται ως κοπριά.

Προβλήματα: μόλυνση, εποχικότητα.

Αποτέφρωση σε διάφορα μέρη:

- μονάδες αποχετεύσεων,
- αποτεφρωτής δημοτικών αποβλήτων,
- εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας.

Αλυσίδες τροφοδότησης

Με συμβατικά φορτηγά. Αν χρησιμοποιούνται τρέιλερ, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί ο κίνδυνος διαρροών.

Τεχνολογίες προεπεξεργασίας και χρησιμοποίησης

- Μηχανική αφύγρανση στις μονάδες υπονόμων,
- Θερμική αφύγρανση στη μονάδα αποχέτευσης ή στο εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου με χρήση της θερμότητας των απαερίων καύσης.

Αντιμετώπιση κινδύνων: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η υγεία και η ασφάλεια του λειτουργικού προσωπικού

Ο εξοπλισμός και οι διαδικασίες πρέπει να συμφωνούν με την περιβαλλοντική νομοθεσία που σχετίζεται με τη λάσπη και σε μερικές περιπτώσεις με επιβλαβείς ουσίες.

Οι κύριοι κίνδυνοι είναι:

- οι μυρωδιές από τη βιολογική λάσπη,
- η τοπική μόλυνση από σκόνη που δημιουργείται από τη διαδικασία παραγωγής του καυσίμου,
- κάθε επικίνδυνο χημικό συστατικό το οποίο μπορεί να περιέχεται στη λάσπη.

Τεχνικά, πολιτειακά και οικονομικά εμπόδια

Τεχνικά εμπόδια:

- χαμηλή κατώτατη θερμογόνο δύναμη (LCV) και υψηλή περιεκτικότητα υγρασίας

Οικονομικά εμπόδια:

- ανταγωνισμός με την τεχνική απόρριψης τους στο έδαφος ,
- ανταγωνισμός με τα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας. Η τσιμεντοβιομηχανία έχει το προνόμιο να μη χρειάζεται να αποβάλλει τη στάχτη.

Πολιτειακά εμπόδια:

- αντίδραση του τοπικού πληθυσμού,
- απαγόρευση των αποτεφρωτηρών που καίνε φωσφορικά απόβλητα.

Συνιστώμενες πολιτικές ενέργειες

Θέσπιση νόμου που απαγορεύει την απόρριψη λάσπης με μεγάλη αγρονομική σημασία και χαμηλή συγκέντρωση σε ρύπους

Έξοδα σύστασης και λειτουργικά έξοδα (CAPEX/OPEX)

CAPEX:

- Για παστοειδή λυματολάσπη: το ίδιο με τη «βιομηχανική λάσπη»
- Για ξηρή λυματολάσπη: το ίδιο με τα «ζωικά άλευρα»

OPEX: 5 - 10€ ανά τόνο

Προοπτική μείωσης του CO₂

Συγκέντρωση βιομάζας = 100%

Πλήρης αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων

5.2.9 Μπάζα κατασκευών και κατεδαφίσεων

Ανάλογα με τη σύνθεση των μπάζων, το ποσοστό τους που μπορεί να καεί ποικίλει. Μεγαλύτερο ενδιαφέρον για την τσιμεντοβιομηχανία παρουσιάζουν τα νεύρα που χρησιμοποιούνται για τις στέγες στα κτίρια πολλών χωρών. Πορτοπαράθυρα χρησιμεύουν μόνο όταν είναι ξύλινα, καθώς τα πλαστικά από PVC (polyvinyl-chloride) δεν είναι συμβατά με τις προδιαγραφές της τσιμεντοβιομηχανίας. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ταξιθετημένα χαλίκια ως πρώτη ύλη για την παραγωγή τσιμέντου.

Προέλευση

- Κατασκευές,

- Ανακαινίσεις.

Κύρια χαρακτηριστικά:

- μεγάλη ανομοιομορφία,
- μεγάλη γεωγραφική διασπορά των πηγών.

Σύνθεση

- Χλώριο: ανάλογα με την περιεκτικότητα σε PVC,
- υγρασία: 5 – 10% για πλαστικά απόβλητα, 15 – 20% για χαρτιά και χαρτόνια,
- μεταλλικά στοιχεία: <1.000 ppm.
- LCV:
 1. πλαστικά: 28 – 35 GJ/ton,
 2. χαρτιά και χαρτόνια: 10 – 15 GJ/ton,
 3. μίξη βιομηχανικών μάζων: 15 – 20 GJ/ton.

Παραδοσιακές τεχνικές απόρριψης/χρήσης

- Υγειονομική ταφή,
- ανάκτηση υλικών: ξύλο, μπετόν, μέταλλα και άλλα,
- συμπλήρωση αδρανών.

Αλυσίδες τροφοδότησης

Με φορτηγά

Τεχνολογίες προεπεξεργασίας και χρησιμοποίησης

Τεμαχισμός των κομματιών που προορίζονται για παραγωγή εναλλακτικού καυσίμου:

- ειδική προσοχή στα πλαστικά, λόγω της πιθανότητας ύπαρξης PVC (κίνδυνος ύπαρξης χλωρίου),
- τα επικίνδυνα απόβλητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην τσιμεντοβιομηχανία μετά τον τεμαχισμό.

Αντιμετώπιση κινδύνων: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η υγεία και η ασφάλεια του λειτουργικού προσωπικού

Ο εξοπλισμός και οι διαδικασίες θα πρέπει να είναι σύμφωνες με την περιβαλλοντική νομοθεσία που σχετίζεται με την κατασκευή και τις κατεδαφίσεις.

Ειδική προσοχή σε:

- χλώριο,
- σύσταση στάχτης,
- ασφαλής αποθήκευση.

Τεχνικά, πολιτειακά και οικονομικά εμπόδια

Τεχνικά εμπόδια:

- αξιόπιστη πηγή μπαζών και δίκτυο ταξινόμησης: παραγωγή SRF/RDF, ζώνες ταξινόμησης κοντά στις κατασκευές, κλπ.

Οικονομικά εμπόδια:

- ανταγωνισμός με την υγειονομική ταφή που είναι ο κύριος προορισμός.

Συνιστώμενες πολιτικές ενέργειες

- Νομοθεσία που απαγορεύει την υγειονομική ταφή των αποβλήτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν καύσιμα ή μη ταξιθετημένων αποβλήτων,
- τα πρότυπα για τα αδρανή πρέπει να αναθεωρηθεί ώστε να συμπερολαμβάνει τα ανόργανα υλικά σαν αδρανή.

Έξοδα σύστασης και λειτουργικά έξοδα (CAPEX/OPEX)

Τα ίδια με τα «μη επιβλαβή εργοστασιακά απόβλητα

Προοπτική μείωσης του CO₂

- Ξύλινα κομμάτια: συγκέντρωση βιομάζας = 100%,
- τυπικά απόβλητα: συγκέντρωση βιομάζας = 10 – 50%,
- πλήρης αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων.

5.2.10 Βιομάζα και πράσινα απόβλητα

Προέλευση

- Απόβλητα ιστών φυτών όπως τα ξύλα και ο ξυλάνθρακας (charcoal),
- αγροτικά απόβλητα όπως τα περιβλήματα κόκκων καφέ, άχυρα, υπολείμματα σακχαροκάλαμου, ρίζες κραμβέλαιου (rapeseed stems), φλοιοί ριζιού,
- μη αγροτικά απόβλητα όπως ζωικά λίπη, ζωική κοπριά, κόκκαλα και κρέατα ζώων,
- βιομηχανικά ή ζυμώσιμα απορρίμματα νοικοκυριού (industrial or household degradable waste).

Σύνθεση

Συντίθενται κυρίως από οργανική ύλη, η οποία απελευθερώνει ενέργεια όταν αντιδρά ή καίγεται με οξυγόνο [96]. Η σύνθεση ποικίλλει με βάση το είδος των αποβλήτων [97]. Μερικά παραδείγματα δίνονται παρακάτω.

Περιβλήματα κόκκων καφέ:

- χλώριο < 0,5%,
- υγρασία 10-20%,
- στάχτη: ίχνη διοξειδίου πυριτίου,
- έγεθος κόκκου < 15mm,
- Κατώτερη Θερμογόνος δύναμη: 17GJ/ton επί ξηρού.

Υποπροϊόντα πουλερικών:

- χλώριο < 0,4-0,8%,
- υγρασία 15-30%,
- στάχτη: 10-30%,
- Κατώτερη Θερμογόνος δύναμη (LCV): 10-13 GJ/ton.

Γλυκερίνη:

- χλώριο: ανεπαίσθητο,
- υγρασία: 5-10%,
- στάχτη: 0%,
- κατώτερη Θερμογόνος δύναμη: 25-35 GJ/ton.

Παραδοσιακές τεχνικές απόρριψης/χρήσης

- Συχνά οι αγρότες καίνε τα απόβλητα τα οποία θα μπορούσαν να καταλήξουν ως βιομάζα και χρησιμοποιούν τη στάχτη τους για λίπασμα. Οι κτηνοτρόφοι τα κατεργάζονται και τα χρησιμοποιούν σα τροφή για τα ζώα άμεσα ή μετά από επεξεργασία,
- ανάκτηση ενέργειας: συχνά χρησιμοποιούνται για την ενεργειακή ανάκτηση από εργοστάσια παραγωγής ενέργειας.

Αλυσίδες τροφοδότησης

Για τη περισυλλογή των φυτικών αποβλήτων πρέπει να ληφθεί υπόψη η χαμηλή πυκνότητα αυτών (0,1 ton/m³ ή λιγότερο) και το γεγονός ότι οι πηγές τους παρουσιάζουν μεγάλη γεωγραφική διασπορά. Λύση γ' αυτό το πρόβλημα θα μπορούσε να αποτελέσει η δημιουργία ειδικών σταθμών

συγκέντρωσής τους, οι οποίοι θα τα προστατεύουν από τη βροχή, ώστε να μειώνεται ο χρόνος περισυλλογής.

Τεχνολογίες προεπεξεργασίας και χρησιμοποίησης

Αρχικά αλέθεται και έπειτα μορφοποιείται σε παλέτες. Στη συνέχεια μειώνεται το περιεχόμενο υγρασίας μέσω ηλιακής ή θερμικής ενέργειας.

Αντιμετώπιση κινδύνων: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η υγεία και η ασφάλεια του λειτουργικού προσωπικού

Η αποθήκευση πρέπει να γίνει κατάλληλα για να αποφευχθεί η επιδρομή των τρωκτικών, πιθανότητα φωτιάς και η αποφυγή δημιουργίας σκόνης που μπορεί να μολύνει την τοπική κοινωνία.

Τεχνικά, πολιτειακά και οικονομικά εμπόδια

Τεχνικά εμπόδια:

- η συγκέντρωση στάχτης στη βιομάζα (20-50% επί ξηρού),
- συγκέντρωση χλωρίου (1-5% επί ξηρού).

Οικονομικά εμπόδια μπορούν να προκύψουν:

- από τον ανταγωνισμό με άλλες εταιρίες που επιθυμούν την χρήση βιομάζας για ενεργειακή ανάκτηση.

Συνιστώμενες πολιτικές ενέργειες

- Απαγόρευση καύσης βιομάζας στα αγροτικές γαίες,
- προώθηση ασφαλούς χρήσης βιομάζας,
- ανάπτυξη δικτύου πληροφόρησης για τους αγρότες.

Έξοδα σύστασης και λειτουργικά έξοδα (CAPEX/OPEX)

CAPEX: (5 - 10) * 1.000.000 €

OPEX : (10 - 20) * 1.000.000 € ανά τόνο

Προοπτική μείωσης του CO₂

- Συγκέντρωση βιομάζας = 100%,
- πλήρη αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων.

5.2.11 Ζωικά άλευρα

Προέλευση

Τα ζωικά άλευρα (animal meal) παράγονται σε εγκαταστάσεις αξιοποίησης καταλοίπων ζωικής προέλευσης (rendering facilities) που είναι υπεύθυνα για τη διαχείριση αποβλήτων ζωικής προέλευσης, σφαγείων και κτηνοτροφίας. Σύμφωνα με την υπάρχουσα νομοθεσία υπάρχει μια επιτρεπόμενη ποσότητα για χρήση ζωικών αλεύρων για την ανάκτηση ενέργειας με σκοπό την αποφυγή διάδοσης ασθενειών.

Σύνθεση

- Χλώριο < 0,5%,
- υγρασία 10-20%,
- Κατώτερη Θερμογόνος δύναμη: 15-17 GJ/ton.

Προσοχή: Αν η συγκέντρωση λίπους είναι σε ποσοστό μεγαλύτερα από 15%, υπάρχει κίνδυνος φραγής (clogging).

Παραδοσιακές τεχνικές απόρριψης/χρήσης

Συχνή χρήση των ζωικών αλεύρων είναι ως τροφή για ορισμένα ζώα και ψάρια με την προϋπόθεση ότι δεν είναι μολυσμένα. Επίσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως λίπασμα. Σε περίπτωση μολυσμένων αλεύρων χρησιμοποιούνται για ενεργειακή ανάκτηση (τρελές αγελάδες-mad cow, το 1980-2000).

Αλυσίδες τροφοδότησης

Η πιο βολική λύση είναι η μεταφορά με βυτία σε σιλό που βρίσκονται στην περιοχή της τσιμεντοβιομηχανίας.

Τεχνολογίες προεπεξεργασίας και χρησιμοποίησης

Η προεπεξεργασία γίνεται στις εγκαταστάσεις αξιοποίησης καταλοίπων ζωικής προέλευσης.

Αντιμετώπιση κινδύνων: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η υγεία και η ασφάλεια του λειτουργικού προσωπικού

Η αποθήκευση πρέπει να γίνει κατάλληλα για να αποφευχθεί η επιδρομή των τρωκτικών, πιθανότητα φωτιάς και η αποφυγή δημιουργίας σκόνης που μπορεί να προκαλέσει εκρήξεις.

Τεχνικά, πολιτειακά και οικονομικά εμπόδια

- Οι ποσότητες που είναι διαθέσιμες για την παραγωγή ζωικών αλεύρων ποικίλλουν ανάλογα με την ισχύουσα νομοθεσία τη δεδομένη χρονική περίοδο (παράδειγμα απαγόρευση λόγω επιδημιών),
- σε κάποιες περιπτώσεις η χρήση των ζωικών αλεύρων μπορεί να προκαλέσει την αντίδραση κάποιας μερίδας του πληθυσμού λόγω διαφορετικών ιδεολογικών αντιλήψεων.

Έξοδα σύστασης και λειτουργικά έξοδα (CAPEX/OPEX)

CAPEX: $(5 - 1) * 1.000.000 \text{ €}$

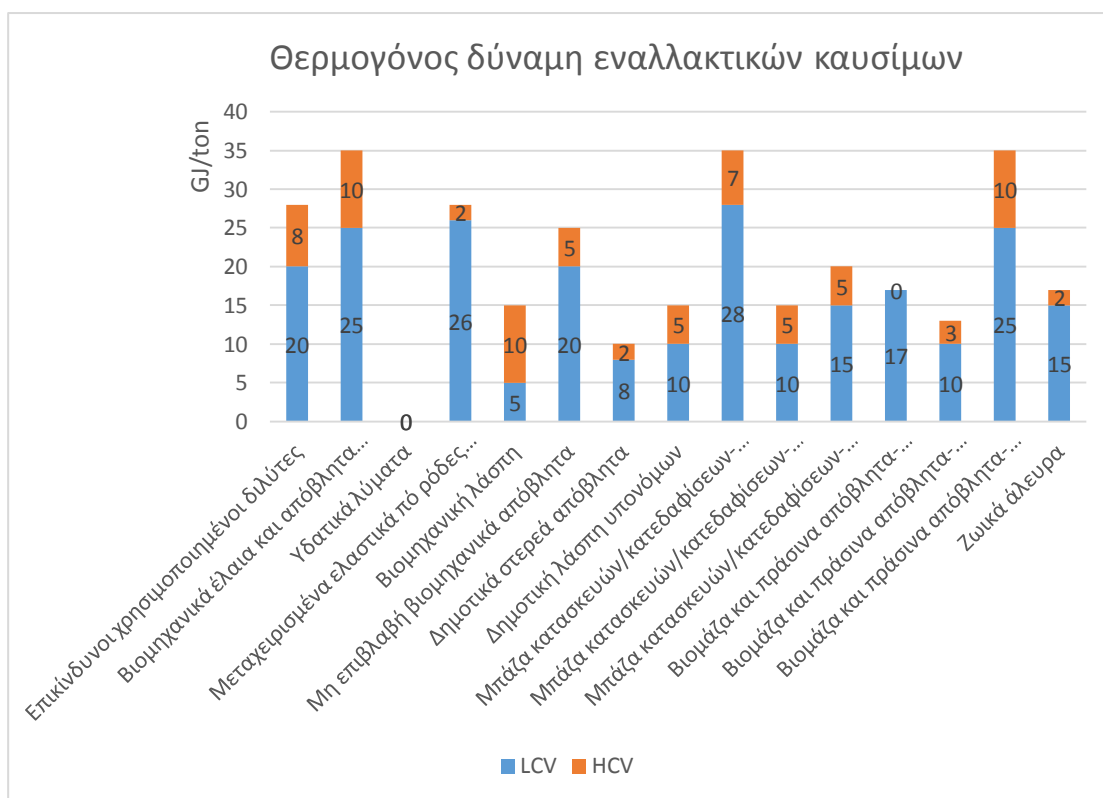
OPEX : $(5) * 1.000.000 \text{ €/ton}$

Προοπτική μείωσης του CO₂

- Συγκέντρωση βιομάζας = 100%,
- πλήρης αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων.

Παρακάτω παρατίθεται ο Πίνακας 5-1 με συγκεντρωμένα τα δεδομένα που αναφέρθηκαν πιο πάνω και σχεδιάστηκε σε φύλλο εργασίας.

Πίνακας 5-1 : Θερμογόνος δύναμη εναλλακτικών καυσίμων



Κεφάλαιο 6: Βέλτιστες διαθέσιμες τεχνικές εξοικονόμησης ενέργειας

Σε ένα εργοστάσιο τα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας πρέπει να είναι τέτοια, ώστε να μειώνουν τις συνολικές ενεργειακές ανάγκες του, αλλά ταυτόχρονα να μην επηρεάζουν αρνητικά το ρυθμό παραγωγής, την ποιότητα του προϊόντος και το περιβάλλον. Υπάρχουν τρεις βασικοί κλάδοι στους οποίους μπορούν να ενταχθούν τα διάφορα μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας:

- βοηθητικός εξοπλισμός (κινητήρες, αντλίες, συμπιεστές κτλ.),
- έλεγχος της προοπτικής επένδυσης για νέο, λιγότερο ενεργοβόρο εξοπλισμό, σωστή λειτουργία και συντήρηση του,
- βελτιστοποίηση της παραγωγικής διαδικασίας με χρήση των Βέλτιστων Διαθέσιμων Τεχνικών (Best Available Techniques, BAT),
- συγχρονισμός και βέλτιστη συνεργασία μεταξύ των διαφόρων συστημάτων και διαδικασιών του εργοστασίου που οδηγεί στη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητάς τους.

Για την επίτευξη των οικονομικών και περιβαλλοντικών στόχων μίας επιχείρησης τόσο περίπλοκης όσο ένα εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου είναι απαραίτητη η σύσταση μιας δομημένης και οργανωμένης πολιτικής διαχείρισης ενέργειας, που στόχο έχει την καθιέρωση και τον έλεγχο μέτρων εξοικονόμησης ενέργειας.

Μία δεύτερη κατηγοριοποίηση των τεχνικών εξοικονόμησης ενέργειας μπορεί να γίνει βάσει του σταδίου της παραγωγικής διαδικασίας στο οποίο εφαρμόζονται. Έτσι, βελτιώσεις μπορούν να επιτευχθούν στα ακόλουθα:

- συστήματα διαχείρισης ενέργειας,
- αποθήκευση και προετοιμασία των πρώτων υλών,
- αποθήκευση και προετοιμασία καυσίμων,
- μείωση της ενέργειας (π.χ. ανά τόνο τσιμέντου) που απαιτείται,
- τελική άλεση του τσιμέντου,
- γενικές τεχνικές,
- τροποποίηση του τελικού προϊόντος ή των πρώτων υλών,
- χρήση εναλλακτικών καυσίμων/πρώτων υλών.

Μία δευτερογενής πτυχή μεθόδων της εξοικονόμησης ενέργειας που συχνά παραβλέπεται, αλλά αν εφαρμοστεί σωστά οδηγεί σε αξιόλογα επίπεδα εξοικονόμησης, είναι η ενσωμάτωση του προσωπικού στην προσπάθεια αυτή. Το προσωπικό θα πρέπει να εκπαιδευτεί ώστε να χρησιμοποιεί με τον βέλτιστο αποδοτικό τρόπο τις σύγχρονες τεχνολογίες, καθώς και να ακολουθεί απλές μεθόδους εξοικονόμησης ενέργειας όπως να κλείνει τα φώτα κατά την αποχώρησή του από ένα χώρο και να κλείνει τις πόρτες και τα παράθυρα. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι αυτές οι μέθοδοι δεν απαιτούν την επένδυση αρχικού κεφαλαίου. Είναι σύνηθες το φαινόμενο, κατά το οποίο παρά το γεγονός ότι οι αντίστοιχες μέθοδοι είναι γνωστές από τους μάνατζερ χαμηλού επιπέδου, δε μεταδίδονται αποδοτικά στο προσωπικό [98]. Έχει παρατηρηθεί ότι ο βέλτιστος τρόπος θέσπισης τέτοιων κανόνων από το προσωπικό της εταιρείας είναι τα συστήματα επιβράβευσης.

Υπάρχουν διεθνώς αναγνωρισμένα συστήματα περιβαλλοντικής διαχείρισης, όπως το ISO14001, που βοηθούν τις εταιρείες να ελέγχουν την ενέργεια που καταναλώνουν και να εφαρμόζουν μέτρα εξοικονόμησης ενέργειας.

6.1 Συστήματα και προγράμματα διαχείρισης ενέργειας

6.1.1 Προγράμματα διαχείρισης ενέργειας

Τα προγράμματα διαχείρισης ενέργειας (energy management programs) αποτελούν μία από τις πιο επιτυχημένες και λιγότερο δαπανηρές μεθόδους για την εξοικονόμηση ενέργειας. Η δημιουργία ενός τέτοιου προγράμματος οδηγεί στη μέγιστη εκμετάλλευση των υφιστάμενων τεχνολογιών και βοηθά για μία συνεχόμενη εξέλιξη των εργοστασίων. Είναι απαραίτητο για την αντιμετώπιση οργανωτικών εμποδίων, όπως η έλλειψη επικοινωνίας μεταξύ των διαφόρων τμημάτων του εργοστασίου, η έλλειψη ενημέρωσης σχετικά με τις νέες τεχνικές, και η διάθεση για τη μετάβαση στη νέα πολιτική. Σύμφωνα με την **US EPA** τα κύρια στοιχεία ενός καλού προγράμματος ενεργειακής διαχείρισης συνοψίζονται στην Εικόνα 6-1.



Εικόνα 6-1: Κύρια στοιχεία της στρατηγικής ενεργειακής διαχείρισης [99]

Είναι απαραίτητη η σύνταξη μιας ομάδας επιθεωρητών και διοικητικών στελεχών (managers), με ισχύ σε όλα τα τμήματα του εργοστασίου για τη δημιουργία και την τήρηση της ενεργειακής πολιτικής στην πράξη. Στη συνέχεια γίνονται τακτικές αναθεωρήσεις δεδομένων για την ενέργεια που χρησιμοποιεί το εργοστάσιο, τεχνικές αναφορές και συγκριτικές αξιολογήσεις με απώτερο σκοπό τον ορισμό μιας έγκυρης εκτίμησης της ενέργειας που χρησιμοποιεί, βάσει της οποίας θα τεθούν οι μελλοντικοί στόχοι και οι απαραίτητες ενέργειες.

6.1.2 Συστήματα ελέγχου ενέργειας

Τα συστήματα παρακολούθησης/ελέγχου ενέργειας (energy monitoring systems) περιλαμβάνουν συσκευές μέτρησης κατανάλωσης ενέργειας καθώς και συστήματα ελέγχου και ρύθμισης. Ελαττώνουν σημαντικά το χρόνο περάτωσης πολύπλοκων διαδικασιών, καθώς επίσης βελτιώνουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος και των δεδομένων που λαμβάνουμε από την παραγωγική διαδικασία. Υπολογίζεται ότι επιφέρουν μείωση των λειτουργικών εξόδων και της ενέργειας τουλάχιστον 5% σε βιομηχανικό επίπεδο.

6.2 Προετοιμασία πρώτων υλών

6.2.1 Αποδοτικά συστήματα μεταφοράς

Υλικά, όπως η τροφοδοσία της καμίνου ή η σκόνη που παράγεται από αυτή και το τελικό προϊόν, δηλαδή τσιμέντο που βρίσκεται σε μορφή σκόνης, απαιτείται να μεταφέρονται με αποδοτικό τρόπο (Efficient transport systems - Dry Process) από σημείο σε σημείο του εργοστασίου, τόσο από άποψη ενέργειας όσο και απώλειας υλικού. Οι δύο μηχανισμοί που έχουν εξελιχθεί περισσότερο είναι οι μηχανικοί και οι πνευματικοί μεταφορείς (mechanical and pneumatic conveyors). Γενικά, οι μηχανικοί μεταφορείς δεν είναι τόσο δαπανηροί όσο οι πνευματικοί. Συγκεκριμένα, οι μηχανικοί μεταφορείς καταναλώνουν 1,9 kWh/short ton (short ton = 2000 lb_m=907,18 kg) πρώτης ύλης λιγότερο από τους πνευματικούς [101]. Το κόστος εγκατάστασης υπολογίζεται στα 2,7 \$/ton πρώτης ύλης.

6.2.2 Συστήματα ανάδευσης και ομογενοποίησης πρώτων υλών

Προκειμένου να ελέγχεται με αποδοτικό τρόπο η πρώτη ύλη, καθώς και να επιτυγχάνονται καλές συνθήκες ανάφλεξης, θα πρέπει οι πρώτες ύλες να ομογενοποιούνται (raw material blending – homogenizing). Ο έλεγχος ποιότητας ξεκινάει από το λατομείο και συνεχίζεται μέχρι τα σιλό ανάμιξης. Αναλυτές, οι οποίοι βρίσκονται σε απευθείας σύνδεση με την ανακυκλοφορία του ακατέργαστου μείγματος, θεωρούνται μείζονος σημασίας για τον έλεγχο ποιότητας [102]. Πολλά εργοστάσια χρησιμοποιούν πεπιεσμένο αέρα ώστε να ανυψώσουν το κονιοποιημένο μείγμα και να επιτύχουν ομογενοποίηση μέσα στα σιλό (χρησιμοποιώντας 1-1,4 kWh/ton πρώτης ύλης). Παλιότερα τα εργοστάσια που λειτουργούσαν με τη διαδικασία επί ξηρού χρησιμοποιούσαν μηχανικά συστήματα για το σκοπό αυτό, αποσύροντας ταυτόχρονα υλικό από 6-8 διαφορετικά σιλό με μη σταθερό ρυθμό [103] χρησιμοποιώντας 2-2,4 kWh/ton πρώτης ύλης. Τα πιο σύγχρονα εργοστάσια για να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας χρησιμοποιούν μεθόδους που σχετίζονται με τη βαρύτητα. Συγκεκριμένα, το υλικό ρέει από διάφορα σημεία εκκένωσης και αναμειγνύεται σε ένα ανεστραμμένο κώνο. Σημειώνεται εδώ ότι η απόδοση μείξης των βαρυτικών μεθόδων, αν και δεν απαιτούν τόση ενέργεια, υστερεί σε σχέση με τη μέθοδο του πεπιεσμένου αέρα. Ωστόσο, τα μοντέρνα εργοστάσια χρησιμοποιούν αυτή τη μέθοδο, διότι η εξοικονόμηση ενέργειας είναι σημαντική [104]. Οι κεφαλαιουχικές δαπάνες για την ανακαίνιση των σιλό εκτιμώνται στα 3,3 \$/ton πρώτης ύλης (έχοντας υποθέσει 55.000 \$ ανά σιλό και μέση χωρητικότητα 150.000 τόνους ετησίως).

6.2.3 Ανάδευση και ομογενοποίηση τσιμεντολάσπης

Κατά την υγρή διαδικασία η τσιμεντολάσπη (slurry) αναδεύεται και ομογενοποιείται με μία συνολική διαδικασία (slurry blending and homogenizing). Η ανάμειξη γίνεται με πεπιεσμένο αέρα και με αναδευτήρες. Η μέθοδος του πεπιεσμένου αέρα είναι επιρρεπής σε απώλειες μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας. Ένα αποδοτικό σύστημα ανάδευσης χρησιμοποιεί 0,3-0,5 kWh/ton πρώτης ύλης [105]. Βελτιώσεις μπορούν να αναζητηθούν μόνο στα συστήματα πεπιεσμένου αέρα (βλ. στην ενότητα [plant-wide measures](#)).

6.2.4 Μύλοι πλύσεως με διαχωριστή κλειστού κυκλώματος

Στις περισσότερες μονάδες υγρής διεργασίας καύσης χρησιμοποιούνται σωληνωτοί μύλοι (tube mills) σε συνδυασμό με διαχωριστές (classifiers) ανοιχτού ή κλειστού κυκλώματος. Ένας αποδοτικός σωληνωτός μύλος χρησιμοποιεί 13 kWh/ton [106]. Αντικαθιστώντας έναν σωληνωτό μύλο με ένα μύλο πλύσεως (wash mill) εξοικονομούμε ενέργεια 5-7 kWh/ton ή 40-60% για την πρωτογενή λειοτριβήση (raw grinding) [107], ενώ οι κεφαλαιουχικές δαπάνες είναι παρόμοιες με των σωληνωτών μύλων.

6.2.5 Χρήση μύλων με ράουλα στην καύση επί ξηρού

Οι πολύ διαδεδομένοι σφαιρόμυλοι (ball mills), που χρησιμοποιούνται για την άλεση των πρώτων υλών, μπορούν να αντικατασταθούν από τα πιο ενεργειακά αποδοτικά συστήματα μύλων με ράουλα (roller mills). Επίσης, είναι δυνατή η συνδυασμένη διάταξη σφαιρόμυλων με πρέσες ραούλων υψηλής πίεσης (high pressure roller presses). Μία τρίτη επιλογή είναι οι οριζόντιοι μύλοι με ράουλα (roller mills). Το πλεονέκτημα είναι ότι εξοικονομούν 6-7 kWh/ton πρώτης ύλης χωρίς να επηρεάζουν την ποιότητα της πρώτης ύλης [108]. Οι κάθετοι μύλοι με ράουλα (vertical roller mills) έχουν ένα επιπλέον πλεονέκτημα, αφού ταυτόχρονα με την άλεση μπορούν να ξηραίνουν την πρώτη ύλη χρησιμοποιώντας μεγάλες ποσότητες χαμηλοβάθμιας απορριπτόμενης θερμότητας (waste heat) από τους ψύκτες κλίνκερ [109].

Παράδειγμα: Το 1998 η εταιρεία Arizona Portland εγκαθιστώντας διατάξεις μύλων με ράουλα κατάφερε να αυξήσει την ποιότητα άλεσης και να μειώσει την ηλεκτρική της κατανάλωση [110]. Οι κεφαλαιουχικές δαπάνες υπολογίζονται στα 5\$/ton πρώτης ύλης [111].

6.2.6 Επεξεργασία φαρίνας κατά την καύση επί ξηρού – οριζόντιοι μύλοι

Οι κάθετοι μύλοι ραούλων παρουσιάζουν προβλήματα δονήσεων. Όταν λειτουργούν υπό υψηλό φορτίο πρώτης ύλης είναι πολύ δύσκολο να ελεγχθούν οι δονήσεις που παράγονται. Αυτό οδηγεί σε υπερθέρμανση του κινητήρα και απαιτείται αρκετός χρόνος αδράνειας (νεκρός χρόνος) προκειμένου να ψυχθεί. Αυτό μειώνει αρκετά την παραγωγικότητα, αφού οι νεκροί χρόνοι μπορεί να φτάσουν έως και τη μία ώρα κάθε φορά. Εγκαθιστώντας μία διάταξη ελέγχου με μοντέλο πολυκριτηριακής πρόβλεψης (model predictive multivariable controller) μεγιστοποιούμε την τροφοδοσία και παραμένουμε σε ασφαλή επίπεδα δόνησης. Η εφαρμογή αυτής της μεθόδου σε ένα εργοστάσιο που μετρούσε περίπου 12 διακοπές το μήνα λόγω δονήσεων οδήγησε στην εξάλειψή τους, οδηγώντας σε αύξηση της παραγωγικότητας κατά 6% και σε μείωση ηλεκτρικής κατανάλωσης κατά 6% [112] ή 0.8-1,0 kWh/ton πρώτης ύλης [113].

6.2.7 Διαχωριστές υψηλής απόδοσης

Οι διαχωριστές ξεχωρίζουν τα χονδρόκοκκα σωματίδια από το καλά αλεσμένο υλικό και τα οδηγούν πίσω στη ροή για να επαναεπεξεργαστούν από το μύλο. Υψηλής αποδοτικότητας διαχωριστές (high efficiency classifiers/separators) μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για την πρώτη ύλη όσο και για τον μύλο που αλέθει το τελικό προϊόν. Οι συνηθισμένοι διαχωριστές, που είναι χαμηλότερης αποδοτικότητας, συχνά οδηγούν προς ανακύκλωση καλά αλεσμένα σωματίδια που δε χρειάζονται επιπλέον άλεση, καταναλώνοντας έτσι άσκοπα μεγαλύτερα ποσά ενέργειας που μπορούν να αποφευχθούν. Αντιθέτως, στους διαχωριστές υψηλής απόδοσης διαχωρισμού, το υλικό μένει για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μέσα στη συσκευή, οδηγώντας σε ακριβέστερη αξιολόγηση λεπτότητας σωματιδίων και αποφεύγοντας την επιπλέον άλεση [114]. Η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας εκτιμάται στο 8% της ειδικής κατανάλωσης. Τα κόστη επένδυσης υπολογίζονται στα 2\$/ετήσιο ton πρώτης ύλης [115].

6.3 Προετοιμασία καυσίμου

Το πιο διαδεδομένο καύσιμο στην τσιμεντοβιομηχανία είναι ο γαιάνθρακας (coal). Η προετοιμασία του καυσίμου (fuel preparation) αποτελείται κυρίως από το σπάσιμο, την άλεση και την αφύγρανση του γαιάνθρακα και συνήθως γίνεται στο εργοστάσιο. Η μεταφορά του γίνεται πάντα όντας βρεγμένος για να αποφεύγεται η δημιουργία ρύπανσης από σκόνη, καθώς και ο κίνδυνος φωτιάς.

Συνήθως για την ανάλυση του γαιάνθρακα χρησιμοποιούνται Raymond bowl mills ή μύλοι ραούλων. Ένας μύλος κρούσης (impact mill) καταναλώνει 45-60 kWh/ton και ένας σωληνωτός μύλος περίπου 25-26 kWh/ton [116]. Η απορριπτόμενη θερμότητα (waste heat) από το σύστημα καμίνου (π.χ. από τον ψύκτη κλίνκερ) χρησιμοποιείται για την αφύγρανση του γαιάνθρακα.

Άλλα χαρακτηριστικά των μύλων με ράουλα είναι ότι μπορούν να χειριστούν μεγαλύτερα μεγέθη, άρα αποφεύγεται η πρωτοβάθμια θραύση του γαιάνθρακα, καθώς και με υψηλότερη υγρασία, ενώ μπορούν να χειριστούν ποικίλα μεγέθη τροφοδοσίας.

Το πλεονέκτημα των σωληνωτών μύλων είναι ότι διαχειρίζονται καλύτερα τον γαιάνθρακα με τραχιά υφή. Οι μύλοι ραούλων, που είναι πιο διαδεδομένοι επί του παρόντος, διαχειρίζονται μεγέθη 5-200 tons/hour. Οι κάθετοι μύλοι ραούλων που έχουν εξελιχθεί για άλεση γαιάνθρακα χρησιμοποιούνται σε πάνω από 100 τσιμεντοβιομηχανίες ανά τον κόσμο [117]. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ενός τέτοιου μύλου εκτιμάται στις 16-18 kWh/ton γαιάνθρακα [118].

Αν και οι κεφαλαιουχικές δαπάνες για ένα κάθετο μύλο ραούλων είναι υψηλότερες, τα λειτουργικά έξοδα είναι χαμηλότερα, δηλαδή το 20% των σωληνωτών μύλων και περίπου το 50% των μύλων κρούσης, εξοικονομώντας 7 - 10 kWh / ton γαιάνθρακα.

6.3.1 Πρέσα ραούλων για άλεση γαιάνθρακα

Οι πρέσες ραούλων αποτελούν το πιο αποδοτικό μέσο για την άλεση γαιάνθρακα. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την άλεση τόσο των πρώτων υλών όσο και του γαιάνθρακα. Πρέπει να λαμβάνονται ειδικά μέτρα για την αποφυγή εκρήξεων. Η χρήση τους στην τσιμεντοβιομηχανία δεν είναι προς το παρόν πολύ δημοφιλής.

6.4 Παραγωγή κλίνκερ διεργασίας καύσης επί ξηρου

6.4.1 Διαδικασίες διαχείρισης συστημάτων ελέγχου

Κάτω από μη ιδανικές συνθήκες λειτουργίας του συστήματος καμίνου, θερμότητα η οποία θα μπορούσε να αξιοποιηθεί είναι πιθανό να διαφύγει. Για τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας και των συνθηκών καύσης χρησιμοποιούνται αυτοματοποιημένα ηλεκτρονικά συστήματα ελέγχου (process control management systems). Επίσης, εξασφαλίζεται η καλύτερη δυνατή ποιότητα προϊόντος όσον αφορά χαρακτηριστικά όπως η αντιδραστικότητα και η σκληρότητα του παραγόμενου κλίνκερ.

Στην αγορά υπάρχουν πολλά είδη τέτοιων αυτοματοποιημένων συστημάτων. Το πιο εξελιγμένο είναι ο **έλεγχος ασαφούς λογικής («fuzzy logic» control)** ή αλλιώς **«expert control»** ή **«rulebased control strategies»**. Το χαρακτηριστικό τους γνώρισμα είναι ότι δε βασίζονται σε μία προκαθορισμένη μοντελοποιημένη διαδικασία αλλά προσπαθούν να προσαρμοστούν και να δουλέψουν όπως ένας άνθρωπος με πληροφορίες που προέρχονται από όλα τα στάδια της διαδικασίας.

Ένα παράδειγμα τέτοιου συστήματος είναι το **ABB LINKman**, που δημιουργήθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο από την Blue Circle Industries και τη SIRA [119]. Για πρώτη φορά χρησιμοποιήθηκε το συγκεκριμένο σύστημα στο εργοστάσιο Blue Circle's Hope Works το 1985 και οδήγησε σε μείωση της κατανάλωσης καυσίμου κατά 8% [120]. Έχει χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε εργοστάσια καύσης τόσο επί ξηρού όσο και επί υγρού. Άλλα παραδείγματα συστημάτων ελέγχου ασαφούς λογικής, πιο σύγχρονα, είναι τα: F.L. Smidth (Denmark), Krupp Polysius (Germany) και Mitsui Mining (Japan). Για όλα τα συστήματα αναφέρονται ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας της τάξης 3-8%, ενώ ταυτόχρονα βελτιώνουν την παραγωγικότητα και την ελαστικότητα της παραγωγικής διαδικασίας. Επίσης, το Krupp Polysius οδηγεί σε αύξηση της ζωής των πυρίμαχων κατά 20-100% της αρχικής προβλεπόμενης διάρκειας ζωής.

Ένας άλλος τύπος συστημάτων ελέγχου είναι τα μοντέλα προληπτικού ελέγχου (model predictive control) χρησιμοποιώντας δυναμικά μοντέλα (dynamic models) για τις διεργασίες της καμίνου. Ένα τέτοιο σύστημα εφαρμόστηκε σε εργοστάσιο στη Νότια Αφρική το 1999 μειώνοντας τις ενεργειακές ανάγκες κατά 4% και κάνοντας απόσβεση της επένδυσης σε 8 μήνες. Πρέπει να συμπεριλάβουμε στον υπολογισμό μας την πολύ χαμηλή τιμή του γαιάνθρακα στη Νότια Αφρική [121].

Επίσης, στα συστήματα ελέγχου λειτουργίας μπορούν να προστεθούν διαχωριστές που δίνουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, δίνοντας την ικανότητα στους επιβλέποντες να κάνουν επιτόπου αλλαγή στο μείγμα με σκοπό την επίτευξη της ιδανικής αναλογίας. Αυτό οδηγεί σε μικρότερες διακυμάνσεις κατά την παραγωγική διαδικασία και κατά συνέπεια μειώνει τις ενεργειακές ανάγκες της. Το εργοστάσιο Blue Circle's St. Marys στον Καναδά εγκατέστησε τέτοιους αναλυτές στους προ-ασβεστοποιητές του το 1999, με αποτέλεσμα την καλύτερη διαχείριση της διαδικασίας και εξοικονόμηση καυσίμων.

Γενικά, η εξοικονόμηση από συστήματα ελέγχου διαδικασίας κυμαίνονται από 2,5- 10% [122], ενώ συχνότερα είναι 2,5-5%. Η απόσβεση της επένδυσης του γίνεται πολύ γρήγορα, ακόμα και σε 3 μήνες ανάλογα με τις συνθήκες του εργοστασίου.

Ο έλεγχος των ψυκτών κλίνκερ βελτιώνει την ανάκτηση θερμότητας αυξάνει το υλικό που μπορεί να επεξεργαστεί, βελτιώνει τον έλεγχο του εναπομένου ασβέστου που δεν έχει αντιδράσει και περιέχεται στο κλίνκερ και μειώνει τις εκπομπές NO_x [123]. Πιο συγκεκριμένα ενσωματώνοντας έναν

Process Perfecter της Pavilion Technologies αυξάνει την τροφοδοσία κλίνκερ κατά 10%, μειώνει την παρουσία εναπομένου ασβέστου που δεν έχει αντιδράσει κατά 30% και εξοικονομεί ενέργεια 5%, ενώ μειώνει τις εκπομπές NO_x κατά 20% [124].

Τα έξοδα εγκατάστασης ανέρχονται στα 0,32 \$/ετήσιο ton κλίνκερ και η απόσβεση της επένδυσης γίνεται περίπου σε ένα χρόνο [125].

6.4.2 Βελτιώσεις στα συστήματα ανάφλεξης καμίνου

Παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν αρνητικά την ενεργειακή απόδοση ενός εργοστασίου παραγωγής τσιμέντου πολύ συχνά έχουν να κάνουν με τα συστήματα ανάφλεξης καυσίμου, με τα πιο συνηθισμένα πεδία προς βελτίωση να είναι η κακή ρύθμιση των συνθηκών φωτιάς, η ατελής καύση καυσίμου που οδηγεί στη δημιουργία μεγάλων ποσοτήτων CO και η ανάφλεξη με περίσσεια αέρα περισσότερο από τον ιδανικό [126].

Έτσι αναπτύσσονται βελτιωμένα συστήματα ανάφλεξης με σκοπό τη βελτιστοποίηση του σχήματος της φλόγας, την όσο το δυνατόν καλύτερη ανάμειξη του αέρα με το καύσιμο πριν την καύση και την ελαχιστοποίηση της χρήσης περίσσιου αέρα.

Τεχνικές που ελέγχουν τη φλόγα οδηγούν σε εξοικονόμηση ενέργειας 2-10% ανάλογα με τον τύπο καμίνου [127]. Άλλες τεχνικές υπόσχονται εξοικονόμηση με τον καλύτερο έλεγχο και χειρισμό των καμίνων. Πειράματα δείχνουν ότι με τη χρήση τεχνικών που ρυθμίζουν τον σχεδιασμό της φλόγας εξοικονομείται το 10% των αναγκών σε καύσιμα, περιορίζοντας στο ελάχιστο τους αντίξοους παράγοντες στο στάδιο δημιουργίας κλίνκερ της καμίνου [128].

Μία ευρέως εφαρμοσμένη μέθοδος η οποία δημιουργήθηκε στην Αυστραλία από το πανεπιστήμιο Adelaide, η οποία εξοικονομεί καύσιμα και ταυτόχρονα μειώνει τις εκπομπές NO_x, είναι η **Gyro-Therm Technology**. Εφαρμόζεται σε καυστήρες που καίνε γκαζολίνη ή μείγμα γκαζιού-γαιάνθρακα. Η καινοτομία έγκειται στη χρήση του πατενταρισμένου “precessing jet” που είναι ένα ακροφύσιο το οποίο είναι με τέτοιο τρόπο σχεδιασμένο ώστε να εκτοξεύει το καύσιμο σε μορφή δέσμης που εκτελεί σχεδόν ελικοειδή κίνηση. Η κίνηση αυτή επιτρέπει την παγίδευση αέρα μέσα στο σώμα της δέσμης οδηγώντας σε πολύ καλή ανάμειξη, χωρίς την ανάγκη μεγάλης ταχύτητας εκτόξευσης του καυσίμου. Έτσι δημιουργούνται οι συνθήκες καύσης με υψηλή περιεκτικότητα καυσίμου. Σαν αποτέλεσμα έχουμε μία υψηλή ακτινοβολούσα φλόγα (luminous flame) που εξασφαλίζει καλή μεταφορά θερμότητας με ακτινοβολία. Η χρήση αυτής της μεθόδου σε ένα εργοστάσιο της Adelaide Brighton στην Αυστραλία οδήγησε σε εξοικονόμηση καυσίμου της τάξης του 5-10%, ενώ σημειώθηκε αύξηση της παραγωγικότητας κατά 10% [129]. Ακόμη, στο αμερικανικό εργοστάσιο Durkee στο Oregon η εξοικονόμηση καυσίμου εκτιμήθηκε στο 2,7-5,7% με αύξηση της παραγωγικότητας 5-9% [130]. Τα κόστη εγκατάστασης ανέρχονται στα 0,9 \$/ετήσιο ton αποθηκευμένου κλίνκερ.

6.4.3 Έμμεση Ανάφλεξη

Ο πιο διαδεδομένος τύπος ανάφλεξης είναι η **απευθείας μέθοδος** (direct-fired system). Το κύριο πρόβλημα αυτής της μεθόδου είναι ότι καθώς ο γαιάνθρακας εισάγεται στον κλίβανο απευθείας, αφού αφυγρανθεί, αλεστεί και κατηγοριοποιηθεί, φέρει μαζί του μεγάλα ποσοστά πρωτεύοντα αέρα (έως και 40% στοιχειομετρικού αέρα). Το γεγονός αυτό περιορίζει τον δευτερεύοντα αέρα που

μπορεί να εισαχθεί στην κάμινο από τον ψύκτη κλίνκερ. Η μη δυνατότητα ελέγχου του πρωτεύοντος αέρα που εισάγεται οδηγεί σε μη βέλτιστη διαδικασία καύσης, με κυριότερα προβλήματα τη μείωση της απόδοσης της φλόγας, διάβρωση των πυριμάχων και χαμηλή ενεργειακή απόδοση, αφού απαιτείται μεγάλη περίσσεια αέρα για την αποδοτική ανάφλεξη του καυσίμου στην κάμινο.

Τα περισσότερα από τα παραπάνω προβλήματα λύνονται σε ικανοποιητικό βαθμό με τη μέθοδο της **έμμεσης ανάφλεξης (indirect firing)**. Με αυτή τη μέθοδο όλη η υγρασία που αρχικά περιεχόταν στον γαιάνθρακα απομακρύνεται στην ατμόσφαιρα και ύστερα ο αλεσμένος γαιάνθρακας μεταφέρεται προς αποθήκευση, αφού πρώτα φιλτραριστεί και εξευγενιστεί από κυκλώνες και σακόφιλτρα. Είναι τότε που ο πλέον πυκνός και καθαρός γαιάνθρακας εισάγεται στην κάμινο με πολύ μικρά ποσά πρωτεύοντος αέρα [131]. Τα ποσοστά του είναι περίπου 5-10%. Η εισαγωγή του καυσίμου και του αέρα από διαφορετικά κανάλια συνεισφέρει και στη βελτιστοποίηση της φλόγας, ειδικά στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται εναλλακτικά καύσιμα. Η βελτιστοποίηση των συνθηκών καύσης επιτυγχάνεται με τη σωστή ρύθμιση του δευτερεύοντος αέρα και την αεροδυναμική κατασκευή του εσωτερικού της καμίνου [132]. Η μέθοδος τελικά οδηγεί σε μείωση των εκπομπών NO_x, καλύτερες συνθήκες καύσης για εναλλακτικά καύσιμα και μείωση των ενεργειακών απωλειών.

Η διείδυση περίσσειας αέρα στην κάμινο οδηγεί σε απώλειες θερμότητας έως 65 kBtu/ton (7MJ /ton). Μειώνοντάς τον κατά 20-30% οδηγούμαστε σε εξοικονόμηση καυσίμου 130-190 kBtu/ton κλίνκερ. Επίσης, αυξάνεται η διάρκεια ζωής της καμίνου και μειώνονται οι εκπομπές NO_x.

Το μειονέκτημα είναι το επιπλέον κόστος επένδυσης. Πληροφορίες από τη χρήση της μεθόδου από την εταιρεία τσιμεντοβιομηχανίας στην Καλιφόρνια του 1997 υποδεικνύουν μείωση των εκπομπών NO_x σε 30-50%, με χρήση μείγματος καυσίμου που περιείχε παλιά λάστιχα. Τα κόστη επένδυσης ανέρχονται στα 5.000.000 \$/ 680.000 ton τσιμέντου το χρόνο.

6.4.4 Εμπλουτισμός σε οξυγόνο

Μία μέθοδος αύξησης της παραγωγικότητας είναι ο εμπλουτισμός του χώρου καύσης με οξυγόνο (oxygen enrichment) και μπορεί να εφαρμοστεί τόσο για σε διεργασία καύσης επί υγρού όσο και σε επί ξηρού. Το επιπλέον κόστος διαμορφώνεται από την τιμή προμήθειας για τις μπουκάλες οξυγόνου. Παρατηρείται αύξηση της ετήσιας παραγωγικότητας 3-7% [133]. Οι απόψεις δίστανται καθώς μερικοί αναφέρουν εξοικονόμηση καυσίμων [134], ενώ άλλοι υποστηρίζουν ότι δεν υπάρχει καμία εξοικονόμηση [135].

Εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας προκύπτει από τον ηλεκτρισμό που χρησιμοποιείται για την παραγωγή οξυγόνου (0,01 kWh/scf) [136]. Χρειάζεται μεγάλη προσοχή και σωστός έλεγχος καθώς εάν το σύστημα εισαγωγής οξυγόνου δε λειτουργεί σωστά, αυξάνονται οι εκπομπές NO_x.

6.4.5 Σφραγίσεις

Οι σφραγίσεις (Seals) χρησιμοποιούνται στην είσοδο και στην έξοδο της καμίνου για την αποφυγή διείδυσης εξωτερικού αέρα και απώλειας θερμότητας. Υπάρχουν διάφοροι τύποι, όπως πνευματικές, λαμαρίνας ή σπειροειδείς σφραγίσεις. Η διάρκεια ζωής τους είναι 10.000 έως 20.000 ώρες λειτουργίας. Ωστόσο, διαρροές μπορούν να υπάρξουν νωρίτερα, οπότε συστήνονται τακτικές επιθεωρήσεις. Σύμφωνα με την *Philips Kiln Services 2001*, αναβαθμίζοντας το εσωτερικό των

σφραγίσεων ενός εργοστασίου στην Ινδία (Maihar cement) μειώθηκε η κατανάλωση καυσίμων κατά 0,4% ή 0,01 MBtu/ton κλίνκερ. Τα κόστη επένδυσης για τη βελτιωμένη συντήρηση των σφραγίσεων αποσβένονται σε λιγότερο από 6 μήνες [137].

6.4.6 Μείωση απωλειών θερμότητας από το κέλυφος της καμίνου

Το κέλυφος της καμίνου αποτελεί μεγάλη επιφάνεια και συνεπώς μπορούν να διαφύγουν μεγάλα ποσά θερμότητας ειδικά στη ζώνη καύσης. Για την ελαχιστοποίηση των απωλειών (kiln shell heat loss reduction) προτείνεται η χρήση καλύτερων μονωτικών και πυρίμαχων, όπως lytherm [138]. Έτσι διασφαλίζεται και η διατήρηση της επένδυσης που αποτρέπει την απώλεια θερμότητας και προστατεύει τα πυρίμαχα τούβλα της ζώνης καύσης. Με τη βελτίωση της μόνωσης μπορεί να εξοικονομηθούν καύσιμα της τάξης 0,1-0,34 MBtu/ton [139]. Τα κόστη ανέρχονται στα 0,23 \$/ετήσια χωρητικότητα κλίνκερ [140].

6.4.7 Πυρίμαχα υλικά

Τα πυρίμαχα υλικά προστατεύουν το χαλύβδινο κέλυφος της καμίνου από τη θερμότητα, τη χημική και το μηχανική καταπόνηση. Η επιλογή του πυρίμαχου υλικού γίνεται ανάλογα με την πρώτη ύλη, τα καύσιμα και τις συνθήκες λειτουργίας. Η επένδυση σε καλύτερης ποιότητας πυρίμαχα μειώνει τις διακοπές λειτουργίας (shut-off time) και την ανανέωση των πυρίμαχων αυξάνοντας την παραγωγικότητα και τα κέρδη [141]. Επίσης μειώνουν τις ενεργειακές ανάγκες καθώς μειώνονται οι χρόνοι εκκίνησης της καμίνου.

6.4.8 Οδηγοί υψικαμίνου

Η περιστροφή της καμίνου χρειάζεται μεγάλα ποσά ενέργειας και επιτυγχάνεται με τη χρήση ηλεκτρικών κινητήρων. Σήμερα στη τσιμεντοβιομηχανία χρησιμοποιούνται πολλοί τύποι κινητήρων με τους πιο σύγχρονους να φτάνουν ισχύ 1000 ίππων (hp) [142]. Σύμφωνα με μελέτες η μεγαλύτερη ενεργειακή απόδοση στην περιστροφή της καμίνου επιτυγχάνεται με τη χρήση μονού οδοντωτού τροχού σε συνδυασμό με συμπλέκτη αέρα και σύγχρονο κινητήρα [143]. Ωστόσο, η πρακτική αυτή αποδίδει εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας μόνο μερικών ποσοστιαίων μονάδων ή 0.5 kWh/ton κλίνκερ.

Η πιο σύγχρονη τεχνική εξοικονόμησης θεωρείται η χρήση κινητήρων AC αντικαθιστώντας τους προϋπάρχοντες DC. Έτσι όχι μόνο βελτιώνεται η εξοικονόμηση ηλεκτρικής ενέργειας στο 0,5–1%, αλλά μειώνονται και οι κεφαλαιουχικές δαπάνες [144]. Υπολογίζεται ότι οι καινούριοι AC κινητήρες σε συνδυασμό με ανεμιστήρες ρυθμιζόμενης ταχύτητας μπορούν να μειώσουν τις ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας κατά 2–8%.

6.4.9 Ανεμιστήρες ρυθμιζόμενης ταχύτητας

Η χρήση δίσκων μεταβλητής ταχύτητας (Adjustable Speed Drives - ASDs) για τους ανεμιστήρες της καμίνου οδηγούν σε μειωμένες ανάγκες ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και μειωμένα κόστη συντήρησης.

Η χρήση ASDs σε εργοστάσιο της Cruz Azul Cement στο Μεξικό είχε ως αποτέλεσμα βελτιωμένη παραγωγική διαδικασία, μεγαλύτερη αξιοπιστία και μείωση της ηλεκτρικής ενέργειας έως και 40% [145] χρησιμοποιώντας κινητήρες 1000 hp. Ωστόσο, η αντικατάσταση του αποσβεστήρα αυτού του εργοστασίου από ASD οδήγησε σε προβλήματα ελέγχου και συντήρησης. Σημειώνεται ότι τα

ποσοστά εξοικονόμησης ενέργειας μπορεί να διαφέρουν σημαντικά από εργοστάσιο σε εργοστάσιο, αφού είναι άμεσα εξαρτημένα από τη διεύθυνση των ανεμιστήρων της καμίνου. Στο εργοστάσιο Woodstock της Lafarge στον Καναδά η αντικατάσταση με ASDs οδήγησε σε μείωση της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας σε 5 kWh/ton [146].

6.4.10 Μετατροπή σε παλινδρομικό ψύκτη εσχάρας

Οι ψύκτες εσχάρας βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σχεδόν σε όλες τις σύγχρονες καμίνους. Τα πλεονεκτήματα ενός ψύκτη εσχάρας είναι η δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλων ποσοτήτων καθώς και η καλή απόδοση στην ανάκτηση θερμότητας, καθώς η θερμοκρασία του κλίνκερ που εξέρχεται από τον ψύκτη εσχάρας κυμαίνεται στους 83°C, έναντι των 120-200°C που αντιστοιχεί στους πλανητικούς ψύκτες (planetary coolers) [147]. Επίσης, τριτογενής ανάκτηση θερμότητας, που βελτιώνει την απόδοση των προασβεστοποιητών, δεν είναι δυνατό να συμβεί με τους πλανητικούς ψύκτες [148], μειώνοντας έτσι την απόδοση σε ανάκτηση θερμότητας. Οι ψύκτες εσχάρας έχουν τη δυνατότητα να ανακτούν μεγαλύτερα ποσά θερμότητας σε σχέση με τις υπόλοιπες κατηγορίες ψυκτών. Για εργοστάσια μεγάλης παραγωγικής δυναμικότητας οι ψύκτες εσχάρας προτιμώνται σαν εξοπλισμός, ενώ για εργοστάσια που παράγουν λιγότερο από 500 tonnes ημερησίως οι ψύκτες εσχάρας δε θεωρούνται βέλτιστη οικονομικά επιλογή [149]. Οι ψύκτες με εσχάρα θεωρούνται απαραίτητοι για ένα σύγχρονο σύστημα καμίνου, ενώ σύνηθες φαινόμενο είναι η αντικατάσταση των πλανητικών ψυκτών [150]. Τα σύγχρονα συστήματα **παλινδρομικού ψύκτη (reciprocating cooler)** έχουν μεγαλύτερο βαθμό θερμικής ανάκτησης σχετικά με τα παλιότερα, αυξάνοντας την απόδοση θερμικής ανάκτησης σε 65% ή και περισσότερο, οδηγώντας σε αύξηση της παραγωγικότητας. Συγκριτικά με τους πλανητικούς ψύκτες, επιπλέον ανάκτηση θερμότητας είναι εφικτή με ένα επιπλέον κόστος σε ηλεκτρική ενέργεια περίπου 2,7 kWh/ton κλίνκερ [151]. Υπολογίζεται ότι με χρήση των παλινδρομικών ψυκτών επιτυγχάνεται μείωση των απαιτούμενων καυσίμων για την κάμινο της τάξης του 8% [152]. Προκειμένου να θεωρείται οικονομικά συμφέρουσα η μετατροπή σε παλινδρομικό ψύκτη θα πρέπει το σύστημα καμίνου να διαθέτει προασβεστοποιητή για την παραγωγή τριτογενούς ρεύματος αέρα ή να είναι εφικτή η αύξηση της παραγωγικότητας του εργοστασίου. Το κόστος μετατροπής σε παλινδρομικό ψύκτη εκτιμάται 0,4-5\$/ton κλίνκερ ετησίως, ενώ το κόστος λειτουργίας τους αυξάνεται κατά 0,1\$/ton κλίνκερ [153].

6.5 Παραγωγή κλίνκερ διεργασίας καύσης επί υγρού

6.5.1 Αφυγραντήρας τσιμεντολάσσης

Στα σύγχρονα συστήματα καμίνου υγρής διεργασίας (wet process), μπορεί να ενσωματωθεί ένας αφυγραντήρας τσιμεντολάσσης (slurry drier), ώστε να αφυγραίνει την τσιμεντολάσση πριν την είσοδό της στην κάμινο, χρησιμοποιώντας τη θερμότητα απαερίων της καμίνου [154]. Έτσι μειώνονται οι ανάγκες σε ενέργεια σημαντικά και αυξάνεται η παραγωγικότητα. Σημειώνεται ότι η διαδικασία αυτή διαφέρει από την ημι-υγρή (semiwet) διεργασία καθώς στη δεύτερη χρησιμοποιείται φίλτρο διήθησης τσιμεντολάσσης (slurry press filter). Ο αφυγραντήρας μπορεί να συνδυαστεί με ένα μύλο με σφυριά (hammer mill) προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα της αποσυσσωμάτωσης [155]. Για τον ίδιο σκοπό θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένας ξηραντήρας με αιώρηση σωματιδίων (gas suspension), αλλά μία εγκατάσταση τέτοιου είδους ξηραντήρα δεν είναι ακόμη εφικτή [156]. Αυτού του είδους οι ξηραντήρες μπορούν και αυξάνουν την απόδοση στη

διεργασία της ξήρανσης και μειώνουν σημαντικά την κατανάλωση καυσίμου για την λειτουργία της υψικαμίνου κατά 1,4MBtu/ton κλίνκερ [157]. Η αρχή της προθέρμανσης/ξήρανσης είναι παρόμοια με αυτή της ημι-ξηρής διεργασίας ή διεργασίας Lelop. Σημαντική διαφορά είναι το ότι για την ημι-ξηρή διεργασία χρησιμοποιείται φαρίνα με περιεχόμενο υγρασίας 10-12% αντί τσιμεντολάσπης, η οποία εμπεριέχει υδατικό περιεχόμενο 28-48%. Η ενέργεια που απαιτείται για την εξάτμιση του υδατικού περιεχομένου κατά την υγρή διεργασία εκτιμάται σε περισσότερα από 24MBtu/ton κλίνκερ [158]. Σε σύγκριση με την κάμινο τύπου Lelop η κατανάλωση είναι το ένα τέταρτο της προηγούμενης για την εξάτμιση του υδατικού περιεχομένου, καθώς η ανάγκη σε ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται κατά 5-7 kWh/ton κλίνκερ [159]. Οι ενεργειακές απαιτήσεις για την εξάτμιση του εμπεριέχοντος νερού είναι δυνατό να υποδιπλασιαστούν με την τοποθέτηση ενός ξηραντήρα τσιμεντολάσπης μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου κατά 1MBtu/ton κλίνκερ. Η καθαρή εξοικονόμηση ενέργειας ανέρχεται σε 0,95 MBtu/ton.

6.5.2 Συστήματα διήθησης

Στην υγρή διεργασία μπορεί να εγκατασταθεί ένα φίλτρο διήθησης (filter press) για τη μείωση της περιεχόμενης υγρασίας σε 20% από το αρχικό ποσοστό που ανέρχεται σε 24-48% (36% κατά μέσο όρο). Έτσι, δημιουργείται μία πάστα τσιμεντολάσπης με το προαναφερθέν περιεχόμενο υγρασίας, έτοιμη για να υποστεί εκβολή για τη δημιουργία παλέτων [160]. Για αυτή τη μείωση του ποσοστού υγρασίας απαιτείται επιπλέον ποσό ενέργειας που αντιστοιχεί σε 4 kWh/ton κλίνκερ παλέτων [161] μειώνοντας την κατανάλωση καυσίμου κατά 1MBtu/ton κλίνκερ [162]. Το κόστος αυτής της μετατροπής εκτιμάται σε 1,6\$/ton κλίνκερ ετησίως με αυξημένο κόστος λειτουργίας 0,1\$/ton κλίνκερ [163].

6.5.3 Συστήματα προθερμαντήρα και προασβεστοποιητή

Αν είναι οικονομικά εφικτό από το εργοστάσιο η κάμινο υγρής διεργασίας μπορεί να μετατραπεί σε μία σύγχρονη κατασκευή που περιλαμβάνει είτε πολυβάθμιο στάδιο προθερμαντήρων είτε έναν προθερμαντήρα/προασβεστοποιητή.

6.6 Παραγωγή κλίνκερ διεργασίας επί ξηρού – συστήματα καμίνου με προθέρμανση

6.6.1 Κυκλωνικά συστήματα αιώρησης σωματιδίων χαμηλής πτώσης πίεσης

Οι διατάξεις κυκλώνων σε συνδυασμό με τους προθερμαντήρες αποτελούν βασική παράμετρο της τσιμεντοβιομηχανίας. Η εγκατάσταση νέων κυκλώνων με χαμηλότερες απώλειες πίεσης μειώνουν την κατανάλωση ενέργειας του συστήματος της αποβολής καυσαερίων της υψικαμίνου που γίνεται μέσω ενός ανεμιστήρα. Ανάλογα με την απόδοση του ανεμιστήρα μπορούν να εξοικονομηθούν 0,6-0,7kWh/ton κλίνκερ για κάθε 50mm στήλης νερού (water column) που μειώνεται. Για τις παλαιότερες υψικαμίνους το ποσό εξοικονόμησης μπορεί να φτάσει και τη 1kWh/ton κλίνκερ [164]. Η εγκατάσταση των κυκλώνων μπορεί να είναι ακριβή καθώς αυτό μπορεί να περιλαμβάνει τον επανασχεδιασμό ή την τροποποίηση του συστήματος προθερμαντήρων. Το νέο σύστημα κυκλώνων, πιθανόν να αυξήσει το συνολικό φορτίο σκόνης που προέρχεται από τον προθερμαντήρα. Αυτό το πρόβλημα όμως μπορεί να εξαλειφθεί με την τοποθέτηση ενός μύλου άλεσης σκόνης σε σειρά στο τέλος της διάταξης αυτής. Κόστος τάξης \$2,7/ton κλίνκερ ετησίως εκτιμάται για ένα τέτοιο κυκλωνικό σύστημα πτώσης πίεσης.

6.6.2 Συμπαραγωγή

Τα απαέρια της καμίνου, του συστήματος ψύξης κλίνκερ και του προθερμαντήρα περιέχουν σημαντική ενέργεια που μπορεί να μετατραπεί σε χρήσιμη ισχύ. Μόνο σε συστήματα καμίνων με μακριές υψικαμίνους η θερμοκρασία των απαερίων είναι ικανοποιητικά υψηλή, ώστε να εκμεταλλευθούν κατάλληλα και να υπάρξει ανάκτηση θερμότητας μέσω παραγωγή ισχύος (heat recovery for cogeneration). Τέτοια συστήματα συμπαραγωγής μπορεί να είναι είτε αεριοστρόβιλοι που χρησιμοποιούν την ανεκμετάλλευτη ενθαλπία (heat waste) ή η εγκατάσταση ενός βραστήρα που χρησιμοποιεί αυτή την ενέργεια για τη λειτουργία ενός ατμοστρόβιλου παραγωγής ενέργειας. Η ανάκτηση θερμότητας έχει ελάχιστες εφαρμογές στις τσιμεντοβιομηχανίες με εν σειρά εγκατεστημένους μύλους άλεσης, καθώς η θερμότητα που απελευθερώνεται από την κάμινο χρησιμοποιείται για την αφύγρανση της φαρίνας. Ενώ οι ηλεκτρικές αποδόσεις είναι σχετικά χαμηλές, περίπου 18%, η παραγωγή ενέργειας κυμαίνεται μεταξύ 10 και 23 kWh/ton κλίνκερ [165] και η εξοικονόμηση σε ηλεκτρική ενέργεια ανέρχεται σε 20kWh/ton κλίνκερ. Το κόστος εγκατάστασης ενός τέτοιου συστήματος ανέρχεται σε \$2-4/ton κλίνκερ ετησίως με αντίστοιχο κόστος λειτουργίας \$0,2-0,3/ton κλίνκερ [166]. Το 1999, τσιμεντοβιομηχανίες με συστήματα συμπαραγωγής παράγααν 468 εκατομμύρια kWh [167]. Υποθέτοντας ότι το 34% της ενέργειας που παράγεται σε μία μεγάλο μήκους κάμινο ξηρής διεργασίας απελευθερώνεται μέσω των καυσαερίων [168], εκτιμάται παραγωγή ενέργειας 1200 GWh.

6.6.3 Μετατροπή σε πολυβάθμιο προθερμαντήρα καμίνου

Η εγκατάσταση ενός συστήματος πολυβάθμιων προθερμαντήρων αιώρησης σωματιδίων (multi-stage preheater kiln) πιθανόν να μειώσει τις απώλειες ενέργειας και κατ' επέκταση να αυξήσει την απόδοση του συστήματος. Σύγχρονα συστήματα κυκλώνων και προθερμαντήρων αιώρησης σωματιδίων που έχουν μειωμένη πτώση πίεσης, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης της ανάκτησης θερμότητας και τη μείωση της ισχύος που χρησιμοποιείται στους ανεμιστήρες, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Με την εγκατάσταση νέων συστημάτων προθέρμανσης η παραγωγικότητα της καμίνου ασφαλώς αυξάνεται εξαιτίας του υψηλότερου βαθμού προασβεστοποίησης (30-40%), καθώς η φαρίνα εισέρχεται στην κάμινο. Επίσης, το μέγεθος της καμίνου μπορεί να μειωθεί σημαντικά (20-30%) μειώνοντας τις απώλειες μέσω ακτινοβολίας. Καθώς η παραγωγικότητα αυξάνεται απαραίτητη είναι η εγκατάσταση συστήματος ψύξης κλίνκερ. Η μετατροπή αυτή γίνεται πιο ελκυστική σε περίπτωση που η παλαιότερη κάμινο χρειάζεται αντικατάσταση καθώς η εγκατάσταση μιας νέας είναι οικονομικά επιβαρυνόμενη.

6.7 Τελική άλεση

6.7.1 Έλεγχος διαδικασίας άλεσης

Τα συστήματα ελέγχου για τις διαδικασίες άλεσης αναπτύσσουν τις ίδιες προσεγγίσεις με τις καμίνους. Τα συστήματα ελέγχουν την ροή στο μύλο και στους διαχωριστές, επιτυγχάνοντας προϊόν υψηλής ποιότητας και χωρίς διακυμάνσεις. Αρκετά τέτοια συστήματα εμπορεύονται από έναν μεγάλο αριθμό κατασκευαστών. Ειδικά συστήματα είναι διαθέσιμα στην αγορά από τις αρχές της δεκαετίας του 1990. Το εργοστάσιο South Ferriby της Rugby Group, χρησιμοποιώντας ένα τέτοιο σύστημα μύλου τσιμέντου αύξησε την παραγωγή κατά 3,3% και προσέδωσε αύξηση στην εξοικονόμηση ενέργειας κατά 3%, καθώς η τυπική απόκλιση στην λεπτότητα του τσιμέντου μειώθηκε [169]. Η Krupp Polysius αγόρασε το σύστημα PolExpert και αναφέρει εξοικονόμηση

ενέργειας μεταξύ 2,5 και 10% (κατά μέσο όρο 8%) συνοδευόμενη με αύξηση στην ποιότητα και στην παραγωγή κατά 2,5-10%, μετά την εγκατάσταση συστημάτων ελέγχου στους τελικούς μύλους άλεσης [170]. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν επιτευχθεί με μοντέλα προληπτικού ελέγχου χρησιμοποιώντας νευρωνικό σύστημα στο σφαιρόμυλο ενός εργοστασίου στη νότια Αφρική [171]. Οι τεχνολογίες Pavilion (US) έχουν αναπτύξει ένα νέο νευρωνικό σύστημα ελέγχου που αναφέρουν μία αύξηση της διακίνησης (throughput) της τάξης 4-6% και μείωση της ειδικής κατανάλωσης ενέργειας μέσω της εγκατάστασης ενός μοντέλου προληπτικού ελέγχου στον τελικό σφαιρόμυλο [172].

6.7.2 Προχωρημένες τεχνικές άλεσης

Η ενεργειακή απόδοση των σφαιρόμυλων στο τελικό άλεσμα είναι σχετικά χαμηλή, καταναλώνοντας περισσότερο από 30-42kWh/ton κλίνκερ, σε εξάρτηση βέβαια από την λεπτότητα του τσιμέντου [173]. Μερικές νέες τεχνικές άλεσης μπορούν να μειώσουν σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας στον τελευταίο μύλο άλεσης σε 20-30kWh/ton κλίνκερ, συνπεριλαμβανομένων των ράουλων-πρεσών, μύλων-ράουλων και ράουλων-πρεσών που χρησιμοποιούνται για το πρώτο στάδιο άλεσης σε συνδυασμό με τους σφαιρόμυλους [174]. Οι μύλοι με ράουλα χρησιμοποιούν έναν συνδυασμό συμπίεσης και διάτμησης, χρησιμοποιώντας 2-4 ράουλα άλεσης που βρίσκονται προσαρμοσμένα σε οριζόντια τράπεζα [175]. Σε υψηλής πίεσης πρέσα με ράουλα, δύο ράουλα πιέζουν το υλικό σε πιέσεις μεγαλύτερες των 3500 bar [176] βελτιώνοντας την απόδοση σημαντικά.

Μία άλλη σημαντική τεχνική είναι η Hogomill, που παρουσιάστηκε για πρώτη φορά στην Ιταλία το 1993 [177]. Οι φυγοκεντρικές δυνάμεις που αναπτύσσονται από την κίνηση του κυλίνδρου προκαλούν ένα ομοιόμορφα κατανεμημένο στρώμα μέσα στον κύλινδρο. Το στρώμα αυτό διαπερνά το ράουλο με μία πίεση της τάξης των 700-1000 bar [178]. Το τελικό προϊόν συλλέγεται σε ένα φίλτρο σκόνης. Η τεχνική Hogomill είναι ένας συμπαγής μύλος που μπορεί να παράγει το τελικό προϊόν σε ένα βήμα και για το λόγο αυτό έχει χαμηλό κόστος κεφαλαίου. Αλεσμένο τσιμέντο πόρτλαντ με 3200 cm²/g Blaine καταναλώνει περίπου 21kWh/ton [179] και ακόμη για το ποζολανικό τσιμέντο με Blaine 4000, η ενέργεια που χρησιμοποιείται είναι χαμηλή, της τάξης των 25 kWh/ton [180].

6.7.3 Υψηλής απόδοσης διαχωριστές

Μία τεχνική αύξησης της συνολικής απόδοσης της άλεσης είναι η χρήση υψηλής απόδοσης διαχωριστών (classifiers/separators). Επιτελούν στο να διαχωρίζουν τα λεπτά αλεσμένα σωματίδια από τα τραχύτερα και μεγαλύτερα. Αυτά ανακυκλώνονται πίσω στον μύλο. Οι συμβατικοί διαχωριστές ενδεχομένως να έχουν χαμηλή απόδοση καθώς το μέρος της ανακύκλωσης καταναλώνει ένα ποσό ενέργειας στην άλεση. Στους υψηλής ποιότητας διαχωριστές το υλικό έχει διαχωριστεί με υψηλή αποτελεσματικότητα περιορίζοντας έτσι την διαδικασία ανακύκλωσης μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο την ενέργεια που απαιτείται και προσδίδοντας συνάμα καλή ποιότητα στο τελικό προϊόν.

Μία έρευνα στην Μεγάλη Βρετανία για τους διαχωριστές υψηλής απόδοσης παρατήρησε μείωση της ηλεκτρικής ενέργειας κατά 6kWh/ton τσιμέντου μετά την εγκατάσταση διαχωριστή στον τελευταίο μύλο και αύξηση κατά 25% στην παραγωγή [181]. Η Holderbank εκτιμά μία μείωση κατά

8% της ηλεκτρικής ενέργειας (5kWh/ton τσιμέντου), καθώς άλλες έρευνες εκτίμησαν 1,7-2,3kW/ton τσιμέντου [182].

6.7.4 Βελτιωμένα Μέσα άλεσης

Υλικά με βελτιωμένη αντίσταση στη φθορά μπορούν να εγκατασταθούν στα μέσα άλεσης, ειδικά στους σφαιρόμυλους. Αύξηση στην κατανομή φορτίου (charge distribution) στις σφαίρες και στην σκληρότητα των επιφανειών των μέσων άλεσης, καθώς και στην αντίσταση της φθοράς της εσωτερικής αντίστασης έχουν φέρει μείωση της φθοράς καθώς και κατανάλωση ενέργειας [183]. Βελτιωμένες σφαίρες και επένδυση υψηλής περιεκτικότητας σε χρωμιούχο χάλυβα είναι κάποια από τα προτεινόμενα υλικά. Άλλες βελτιώσεις είναι οι επενδύσεις με ταξινομημένες αυλακώσεις (grooved classifying liners) που έχουν τη δυνατότητα να μειώνουν την ενέργεια που χρησιμοποιείται κατά 5-10% σε μερικούς μύλους που αντιστοιχεί σε εξοικονόμηση ενέργειας ίσης με 1,8kW/ton τσιμέντου [184].

6.8 Μέτρα στο επίπεδο του εργοστασίου (Plant-wide measures)

6.8.1 Προληπτική συντήρηση

Η προληπτική συντήρηση περιλαμβάνει την εκπαίδευση του προσωπικού σε συνήθειες εξοικονόμησης ενέργειας και αποτελεσματικότητας. Τέτοια προγράμματα έχουν προαχθεί επιτυχώς σε αρκετές βιομηχανίες. Παρόλο που πολλές διαδικασίες στην παραγωγή τσιμέντου έχουν αυτοματοποιηθεί, υπάρχουν ακόμα περιθώρια βελτίωσης που απαιτούν την εκπαίδευση των εργαζομένων για την εξοικονόμηση ενέργειας. Επίσης, ο προληπτικός έλεγχος μπορεί να αυξήσει τον βαθμό χρησιμοποίησης (utilization ratio), καθώς αρκετά μηχανήματα έχουν αρκετά μεγάλο χρόνο διακοπής (downtime). Ο *Birch (1990)* αναφέρει ότι η μείωση της εισροής του παρασιτικού αέρα (false air input) στον κλίβανο από το κάλυμμα προστασίας μπορεί να εξοικονομήσει 11kcal/kg κλίνκερ ή 0,04Btu/ton που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της εξοικονόμησης καυσίμου. Ο *Lang* αναφέρει μείωση χρήσης ενέργειας μεγαλύτερη από 5kWh για ποικίλα μέτρα προληπτικής συντήρησης. Σημειώνεται ότι τα έξοδα για την προώθηση προγραμμάτων εκπαίδευσης είναι ελάχιστα.

6.8.2 Κινητήρια συστήματα

Με τον όρο βελτίωση στην ενεργειακή απόδοση ενός κινητήριου συστήματος (κινητήρες, αντλίες, ανεμιστήρες, συμπιεστές κτλ.) εννοούμε τη συνολική απόδοση του συστήματος και όχι της κάθε μηχανής μεμονωμένα. Για την βελτίωση πρέπει να ληφθεί υπόψη η “προσέγγιση του συστήματος” που περιλαμβάνει [185]:

1. την αναγνώριση των εφαρμογών μιας μηχανής σε μία δραστηριότητα που πρόκειται να εγκατασταθεί,
2. τις συνθήκες και τις προδιαγραφές (specifications) κάθε μηχανής,
3. τις ανάγκες της πραγματικής λειτουργίας του συστήματος για το αν οι κινητήρες είναι κατάλληλα σχεδιασμένοι και κατά πόσο αυτοί μπορούν να ικανοποιήσουν τις απαιτούμενες ενεργειακές ανάγκες,

4. την πληροφόρηση για της βασικές επισκευές και αναβαθμίσεις στο σύστημα,
5. την παρακολούθηση αυτών και την συμπερίληψη στο πραγματικό κόστος που εξοικονομείται, αν επιδέχονται αναβαθμίσεων.

6.8.3 Στρατηγική επιλογή κινητήρα

Υπάρχουν κάποιοι σημαντικοί παράγοντες για την επιλογή ενός κινητήρα όπως η ταχύτητα του κινητήρα, η υποδύναμη, ο τύπος έγκλεισης (enclosure type), η ονομαστική ενδεικνύμενη θερμοκρασία, ο βαθμός απόδοσης, η ποιότητα και η παροχή ισχύος. Σημαντικό για την επιλογή και αγορά κινητήρα είναι και το κόστος του κύκλου ζωής πέρα από το αρχικό κόστος και το κόστος εγκατάστασης. Το 95% του κόστους του κινητήρα αποδίδεται στην ενέργεια που καταναλώνει και το 5% στην αγορά, εγκατάσταση και συντήρηση [186].

Η επιλογή ενός ενεργειακά αποδοτικού κινητήρα είναι μια σημαντική στρατηγική για τη μείωση του κόστους κύκλου ζωής. Οι ενεργειακά αποδοτικοί κινητήρες μειώνουν τις ενεργειακές απώλειες μέσω του βελτιωμένου σχεδιασμού τους, τα καλύτερα υλικά, τα αυστηρότερα όρια ανοχής (tighter tolerance) και τις βελτιωμένες τεχνικές παρασκευής. Με τον καταλληλότερο τρόπο εγκατάστασης, οι ενεργειακά αποδοτικοί κινητήρες λειτουργούν καλύτερα, οι οποίοι ενδεχομένως να βοηθούν στην ευκολία σε ανάγκες θερμικού φορτίου, και έχουν περισσότερα προτερήματα όπως μεγαλύτερη διάρκεια μόνωσης και λιγότερες δονήσεις.

Σε κάποιες περιπτώσεις, μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικό από πλευρά κόστους η αποκατάσταση της υπάρχουσας ενεργειακά αποδοτικής μηχανής σε σχέση με την αγορά νέας. Καθώς όμως το κόστος αποκατάστασης μπορεί να ξεπεράσει το 60% της τιμής αγοράς νέου κινητήρα, η αγορά νέου κινητήρα μπορεί να είναι καλύτερη επιλογή [187]. Όταν γίνει η καλύτερη εργασία επισκευής για την αποκατάσταση ενός προβληματικού κινητήρα οι απώλειες στην απόδοση μπορεί να είναι μικρότερες από 0,5-1% [188]. Αντίθετα, μια κακής ποιότητας αποκατάσταση βλάβης μπορεί να καταλήξει σε μεγαλύτερες απώλειες από τις προϋπάρχουσες.

6.8.4 Συντήρηση

Ο σκοπός της συντήρησης ενός κινητήρα είναι να παρατείνει το χρόνο ζωής του, να προβλέψει πιθανές βλάβες και να ρυθμίσει τους παράγοντες μεγιστοποίησης της αποδοτικότητάς του. Η εξοικονόμηση που μπορεί να προσδώσει μία καλή συντήρηση κυμαίνεται από 2-30% της συνολικής ενέργειας του κινητήριου συστήματος κατά την χρήση [189].

6.8.5 Κατάλληλο μέγεθος κινητήρα

Οι ακατάλληλα σχεδιασμένοι κινητήρες καταλήγουν σε άσκοπες ενεργειακές απώλειες. Όταν το σημείο λειτουργίας μπορεί να μειωθεί τότε και το μέγεθος του κινητήρα μπορεί να μειωθεί. Η αντικατάσταση μεγαλύτερων ενεργειακά κινητήρων από τους καταλληλότερους μπορεί να προσδώσει εξοικονόμηση 1,2% της συνολικής ηλεκτρικής κατανάλωσης του κινητήρα [190]. Επίσης, μεγαλύτερη εξοικονόμηση μπορεί να επιτευχθεί αν ένας κινητήρας αντικατασταθεί από περισσότερους πιο μικρούς.

Για τον προσδιορισμό του κατάλληλου μεγέθους ενός κινητήρα πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν το φορτίο του κινητήρα, η απόδοση του κινητήρα στο συγκεκριμένο φορτίο λειτουργίας, οι στροφές

στο μέγιστο φορτίο του κινητήρα που θα αντικατασταθεί και οι στροφές στο μέγιστο φορτίο του νέου κινητήρα.

6.8.6 Οδηγοί ρύθμισης ταχύτητας

Οι οδηγοί αυτοί (Adjustable Speed Drivers - ASD) προσαρμόζουν την ταχύτητα στο απαιτούμενο φορτίο για τη λειτουργία του κινητήρα και επιτελούν στο να χρησιμοποιήσουν το βέλτιστο ποσό ενέργειας για μια συγκεκριμένη εφαρμογή. Τέτοια συστήματα μπορούν να προμηθευτούν από πολλούς προμηθευτές και είναι διαθέσιμα παγκοσμίως [191]. Τυπική εξοικονόμηση ενέργειας με χρήση τέτοιων οδηγών κυμαίνεται από 7-60%. Στην τσιμεντοβιομηχανία χρησιμοποιούνται ευρέως τέτοιοι μηχανισμοί αλλά οι εφαρμογές μπορεί να ποικίλουν καθώς είναι σημαντικά εξαρτημένες από το κόστος του ρεύματος. Σε ένα εργοστάσιο τσιμέντου οι ASD εφαρμόζονται ευρέως στους ανεμιστήρες της καμίνου, του ψύκτη, των προθερμαντήρων, των διαχωριστών και των μύλων.

6.8.7 Συντελεστής διόρθωσης ισχύος

Επαγωγικά φορτία όπως οι μετασχηματιστές, οι ηλεκτρικοί κινητήρες και ο φωτισμός εκκένωσης υψηλής έντασης (HID lighting) προκαλούν έναν μικρό συντελεστή ισχύος που καταλήγει σε αυξημένη κατανάλωση ισχύος και αυξάνει έτσι το κόστος. Ο παράγοντας αυτός μπορεί να διορθωθεί με την ελαχιστοποίηση των στοιχείων λειτουργίας σε βραδυπορεία (ρελαντί-idling) του ηλεκτρικού κινητήρα, αντικαθιστώντας αυτούς με κινητήρες υψηλής απόδοσης και εγκαθιστώντας πυκνωτές στο AC κύκλωμα ρεύματος για να μειωθεί το πλάτος της άεργου ισχύος του συστήματος.

6.8.8 Συστήματα αέρα συμπίεσης

Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται σε διάφορα μέρη του εργοστασίου όπως στην υγρή διεργασία ανάμειξης της τσιμεντολάσπης (slurry) και στα σακκόφιλτρα (baghouses) Pulse-jet ή Plenum Pulse συλλέκτες σκόνης καθώς και σε άλλα μέρη. Η συνολική κατανάλωση ενέργειας από τα συστήματα συμπίεσης αέρα είναι σχετικά χαμηλή στην τσιμεντοβιομηχανία αλλά μπορούν να προσδώσουν μεγάλα έξοδα αν αυτά είναι διαρκώς σε λειτουργία. Βελτίωση στην εξοικονόμηση ενέργειας υπάρχει και σε αυτά τα συστήματα. Ο συμπιεσμένος αέρας προσδίδει μεγάλες δαπάνες στο εργοστάσιο καθώς αποτελεί μια από τις πιο ακριβές μορφές διαθέσιμης ενέργειας εξαιτίας της χαμηλής απόδοσης. Τυπικά, η συνολική απόδοση για το συμπιεσμένο αέρα είναι περίπου 10% [192]. Λόγω αυτής της μικρής απόδοσης, αν χρησιμοποιείται συμπιεσμένος αέρας καλό θα ήταν να χρησιμοποιείται σε μικρή ποσότητα για το ελάχιστο δυνατό χρονικό διάστημα.

6.8.9 Συντήρηση συστημάτων συμπιεσμένου αέρα

Μη επαρκής συντήρηση μπορεί να αμβλύνει την απόδοση συμπίεσης και να αυξήσει την διαρροή αέρα και τη μεταβλητότητα της πίεσης, καθώς και να αυξήσει τις θερμοκρασίες λειτουργίας και να μειώσει την ποιότητα στον έλεγχο της υγρασίας. Η κατάλληλη συντήρηση θα μειώσει αυτά τα προβλήματα και θα οδηγήσει στην εξοικονόμηση ενέργειας που συμπεριλαμβάνει [193] τις ακόλουθες οδηγίες.

- Κρατήστε τον συμπιεστή και τις περιοχές ενδιάμεσης ψύξης καθαρές. Τα βρώμικα φίλτρα αυξάνουν την πτώση πίεσης. Μπορούμε να κρατήσουμε την πτώση πίεσης χαμηλή

καθαρίζοντας τακτικά τα φίλτρα. Ψάξτε για φίλτρα με 1psig πτώση πίεσης. Επαναφέροντας τα φίλτρα κατάλληλα θα εμποδίσουν τους ρύπους να εισέλθουν στα διάφορα εργαλεία και να τα φθείρουν σταδιακά. Γενικά, όταν η πτώση πίεσης ξεπεράσει τα 2-3psig αντικαταστήστε τα συναρμολογούμενα μέρη και ελέγξτε τα κάθε χρόνο. Επίσης, βάλτε φίλτρα συνδεδεμένα παράλληλα που μειώνουν την ταχύτητα του αέρα και επομένως την πτώση πίεσης. Μία μείωση της ετήσιας κατανάλωσης ενέργειας της τάξης του 2% οφείλεται στην αλλαγή φίλτρων [194].

- Κρατήστε τον κινητήρα κατάλληλα λιπασμένο και καθαρό. Η κακή ψύξη του μπορεί να αυξήσει τις θερμοκρασίες λειτουργίας και την αντίσταση του αέρα και τελικά να μειώσει τη διάρκεια ζωής του κινητήρα. Ακόμη, αυξάνει την κατανάλωση ενέργειας. Η λίπανση του συμπιεστή πρέπει να γίνεται κάθε 2-18 μήνες και να ελέγχεται ώστε να κρατιέται σε κατάλληλο επίπεδο ο συμπιεστής. Τέλος, αυτό μπορεί να βοηθήσει στην αποφυγή της διάβρωσης και υποβάθμισης του συστήματος.
- Ελέγξτε τους ψύκτες στον συμπιεστή για να διαβεβαιώσετε ότι ο αφυγραντήρας έχει τη χαμηλότερη δυνατή θερμοκρασία [195].
- Ελέγξτε τους μιάντες για τυχούσες φθορές κάθε 400 ώρες λειτουργίας.
- Ελέγξτε τα συστήματα ψύξης νερού για την ποιότητα του νερού, τη ροή και τη θερμοκρασία. Καθαρίστε και αντικαταστήστε τα φίλτρα και τους εναλλάκτες θερμότητας σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή.

6.8.10 Μείωση διαρροών

Οι διαρροές μπορούν να γίνουν πηγή σημαντικής απώλειας ενέργειας. Ένα εργοστάσιο που δεν έχει συντηρηθεί σωστά μπορεί να έχει διαρροές από 20-50% της συνολικής παραγωγής συμπιεσμένου αέρα [196]. Η συντήρηση των διαρροών μπορεί να μειώσει αυτό το νούμερο σε λιγότερο από 10%. Συνολικά, η κατανάλωση ενέργειας μπορεί να μειωθεί κατά 20% ετησίως με την επισκευή των διαρροών στα συστήματα συμπιεσμένου αέρα [197]. Οι διαρροές εξαρτώνται από το μέγεθος της τρύπας στους σωλήνες ή στον εξοπλισμό και μπορούν να επιτελέσουν στην αρνητική επίδραση του εξοπλισμού, να μειώσουν τη διάρκεια ζωής των εργαλείων και να επηρεάσουν την παραγωγή οδηγώντας σε επιπλέον κόστη συντήρησης.

Τα πιο ευαίσθητα σημεία για διαρροές είναι οι σωλήνες, τα σημεία σύνδεσης, οι ρυθμιστές πίεσης, οι ατμοπαγίδες, οι βαλβίδες διακοπής ροής και τα στεγανοποιητικά υλικά.

6.8.11 Μείωση στη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής

Μειώνοντας τη θερμοκρασία του αέρα εισαγωγής μειώνεται και η ενέργεια που χρησιμοποιείται από τον συμπιεστή. Σε πολλές βιομηχανίες, ο αέρας εισαγωγής μπορεί να ελαττωθεί αν η αναρρόφηση γίνει από το εξωτερικό του κτιρίου. Το να εισάγεται φρέσκος αέρας μπορεί να έχει οφέλη 2 με 5 χρόνων [198]. Για κάθε 5°F (3°C) θα εξοικονομείται 1% της συνολικής ενέργειας του συμπιεστή [199].

6.8.12 Μεγιστοποίηση επιτρεπόμενου σημείου δρόσου ή υγροποίησης στον αέρα εισαγωγής

Είναι σημαντική η επιλογή ξηραντήρα με το μεγαλύτερο σημείο πίεσης υγροποίησης για την καλύτερη απόδοση. Ως κανόνας, ένας ξηραντήρας καταναλώνει από 7 έως 14% της συνολικής ενέργειας του συμπιεστή, ενώ οι refrigerated dryers καταναλώνουν 1-2% της ενέργειας του συμπιεστή [200]. Συνίσταται να χρησιμοποιείται ξηραντήρας με μεταβλητό σημείο δρόσου (floating dew point).

6.8.13 Έλεγχος συμπιεστή

Ο στόχος της κάθε στρατηγικής ελέγχου (control strategy) είναι να τίθεται εκτός λειτουργίας κάθε συμπιεστής που δε χρησιμοποιείται μέχρις ότου να χρειαστεί. Όλες οι μονάδες θα πρέπει να λειτουργούν σε πλήρες φορτίο, εκτός από μία. Η σωστή τοποθέτηση του βρόχου ελέγχου (control loop) είναι επίσης σημαντική. Η εξοικονόμηση ενέργειας για έναν προχωρημένο έλεγχο (sophisticated control) είναι 12% ετησίως [201]. Έναρξη/λήξη λειτουργίας, φόρτιση/εκφόρτιση, στραγγαλισμός (throttling), λειτουργία πολλών σταδίων (multi-step), μεταβλητή ταχύτητα και έλεγχος δικτύου (network controls) είναι κάποιες επιλογές για τον έλεγχο του συμπιεστή και περιγράφονται παρακάτω.

- **Έναρξη/λήξη (start/stop-on/off):** Είναι ο πιο εύκολος έλεγχος και μπορεί να εφαρμοστεί σε παλινδρομικό (reciprocating) ή περιστροφικό (rotary) ελικοειδή συμπιεστή (screw compressor). Για αυτόν τον έλεγχο, ο κινητήρας που κινεί τον συμπιεστή ανοίγει/κλείνει αντίστοιχα σε απόκριση της πίεσης κατάθλιψης (discharge pressure) της μηχανής. Αυτός ο τύπος ελέγχου χρησιμοποιείται σε εφαρμογές με χαμηλούς κύκλους λειτουργίας (duty cycle). Εφαρμογές με συνεχή λειτουργία θα υπερθερμάνουν τον κινητήρα. Τυπικό χρονικό διάστημα απόσβεσης για ελέγχους έναρξης/λήξης είναι 1-2 έτη.
- **Έλεγχος φόρτισης/εκφόρτισης:** Καλείται και έλεγχος σταθερής ταχύτητας, επιτρέπει τον κινητήρα να λειτουργεί διαρκώς αλλά εκφορτίζει τον συμπιεστή όταν η πίεση κατάθλιψης είναι επαρκής. Στις περισσότερες περιπτώσεις, μη φορτισμένοι περιστροφικοί ελικοειδείς συμπιεστές καταναλώνουν 15-35% της ισχύος του συμπιεστή όταν βρίσκεται σε κατάσταση πλήρους φορτίου χωρίς να παράγει καθόλου επιθυμητό έργο [202]. Έτσι, αυτού του είδους ο έλεγχος μπορεί να είναι μη αποτελεσματικός.
- **Έλεγχος στραγγαλισμού (throttling-modulating controls):** Επιτρέπει την έξοδο του συμπιεστή να συναντήσει τις απαιτήσεις με το κλείσιμο της βαλβίδας εισαγωγής και να περιορίσει τον αέρα εισαγωγής στον συμπιεστή. Εφαρμόζονται σε φυγοκεντρικούς και περιστροφικούς ελικοειδείς συμπιεστές. Θέτοντας τον συμπιεστή σε λειτουργία μεταβλητής ταχύτητας από το on/zero/off μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση πάνω από 8% το χρόνο [203].

6.8.14 Σωστή διάμετρος σωλήνα

Μη κατάλληλος σχεδιασμός μπορεί να προκαλέσει απώλειες πίεσης, να αυξήσει τις διαρροές και το κόστος παραγωγής. Αυξάνοντας τυπικά την διάμετρο του σωλήνα μειώνεται η ετήσια κατανάλωση ενέργειας κατά 3% [204].

6.8.15 Ανάκτηση θερμότητας για προθερμανσμένο νερό

Το 80-93% της ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται από έναν βιομηχανικό συμπιεστή με αέρα μετατρέπεται σε θερμότητα. Σε πολλές περιπτώσεις μία μονάδα ανάκτησης θερμότητας μπορεί να ανακτήσει 50-90% της διαθέσιμης θερμικής ενέργειας για τη θέρμανση του χώρου, τη βιομηχανική επεξεργασία θερμότητας, θέρμανση του νερού, συμπλήρωση του αέρα θέρμανσης (makeup air heating), συμπλήρωση του νερού προθέρμανσης του βραστήρα (boiler), τις διαδικασίες βιομηχανικής ξήρανσης του αέρα, τις διεργασίες καθαρισμού και άλλα [205]. Εκτιμάται ότι περίπου 50000 Btu/hour της ενέργειας είναι διαθέσιμη για κάθε 100 cfm της χωρητικότητας (στο πλήρες φορτίο) [206]. Η απόσβεση γίνεται σε λιγότερο από έναν χρόνο. Η ανάκτηση θερμότητας για τη θέρμανση χώρου δεν είναι τόσο κοινή στους συμπιεστές με νερό ψύξης επειδή ένα επιπλέον στάδιο εναλλαγής θερμότητας απαιτείται και η θερμοκρασία της διαθέσιμης θερμότητας είναι χαμηλότερη. Όμως, για μεγάλους τέτοιους νερόψυκτους συμπιεστές οι αποδόσεις ανάκτησης είναι 50-60% [207]. Εφαρμόζοντας αυτό το μέτρο μπορεί να επιτευχθεί εξοικονόμηση ενέργειας της τάξης του 20% στα συστήματα αέρα συμπίεσης ετησίως για τη θέρμανση του χώρου [208].

6.9 Φωτισμός

Η ενέργεια που χρησιμοποιείται για φωτισμό σε τσιμεντοβιομηχανίες είναι πολύ χαμηλή. Όμως ευκαιρίες για εξοικονόμηση σε αυτό τον τομέα μπορούν να βρεθούν.

- **Έλεγχος φωτισμού:** Τα φώτα μπορούν να παραμείνουν κλειστά σε ώρες μη λειτουργίας μέσω συστημάτων αυτομάτου ελέγχου, όπως ανιχνευτές κίνησης (occupancy sensors). Χειροκίνητος έλεγχος μπορεί να γίνεται σε μικρότερους χώρους του εργοστασίου. Απόσβεση για συστήματα ελέγχου φωτισμού γίνεται σε λιγότερο από δύο χρόνια.
- **Αντικατάσταση λαμπών υδραργύρου με λάμπες αλογόνου ή υψηλής πίεσης λάμπες νατρίου:** Εκεί όπου η απόδοση του χρώματος είναι σημαντική οι λάμπες υδραργύρου ή και φθορίου μπορούν να αντικατασταθούν από λάμπες αλογόνου με 50% εξοικονόμηση ενέργειας. Εκεί όπου η απόδοση του χρώματος δεν είναι σημαντική μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι υψηλής πίεσης λάμπες νατρίου για εξοικονόμηση 50-60% [209].
- **Αντικατάσταση HID λάμπες αλογόνου με HI λάμπες φθορίου:** Φωτισμός με HID λάμπες μπορεί να αντικατασταθεί από HI λάμπες φθορίου. Αυτά τα καινούρια συστήματα ενσωματώνουν λάμπες φθορίου, ηλεκτρικά πηνία και υψηλής απόδοσης στηρίγματα (fixtures). Τα πλεονεκτήματα είναι ότι έχουν χαμηλή κατανάλωση, χαμηλότερη απόσβεση lumen (lumen depreciation) έναντι του χρόνου ζωής της λάμπας, καλύτερες επιλογές μείωσης φωτισμού (dimming options), ταχύτερη δυνατότητα εκκίνησης, καλύτερη απόδοση φωτισμού, λιγότερη αντανάκλαση [210]. Τα HI συστήματα φθορίου επιφέρουν 50% εξοικονόμηση ενέργειας έναντι των HID αλογόνου. Συστήματα φωτισμού που είναι μη πρακτικά σε HID συστήματα αλογόνου μπορούν να επιφέρουν μεγάλο οικονομικό όφελος. Επιπλέον, οι HI λάμπες φθορίου βοηθούν στην βελτίωση της παραγωγικότητας και έχουν μειωμένο κόστος συντήρησης.
- **Αντικατάσταση μαγνητικών πηνίων με ηλεκτρικά:** Τα πηνία είναι ένας μηχανισμός που ρυθμίζει το ποσό του ηλεκτρισμού που απαιτείται για να ξεκινήσει ένα σύστημα φωτισμού να λειτουργεί και να παρέχει σταθερού ρυθμού φωτισμό. Τα ηλεκτρικά πηνία εξοικονομούν 12-25% περισσότερη ισχύ από τα μαγνητικά [211].

6.10 Αλλαγές στο προϊόν και στις πρώτες ύλες

6.10.1 Περιεχόμενο αλκαλίων

Στη βόρεια Αμερική, ένα μεγάλο μέρος της παραγωγής τσιμέντου εμπεριέχει χαμηλή ποσότητα σε αλκάλια. Περίπου 20-50% της αγοράς ζητούν τέτοιου είδους τσιμέντου. Σε μερικές περιοχές της Αμερικής θεωρείται ότι η ποιότητα των αδρανών (aggregate) καθορίζεται από την χαμηλή περιεκτικότητα του τσιμέντου σε αλκάλια. Αυτή η μείωση του περιεχομένου αλκαλίων επιτυγχάνεται μέσω μιας παρακαμπτήριας διόδου-διαφυγής (venting-by pass) καυτών αερίων και σωματιδίων από το εργοστάσιο, γεμάτη με αλκάλια που λέγεται και σκόνη της καμίνου (Cement Kiln Dust-CKD). Αυτή η δίοδος παίζει σημαντικό ρόλο στην αποφυγή της φραγής του προθερμαντήρα. Πολλοί πελάτες ζητούν τσιμέντο με χαμηλή περιεκτικότητα σε αλκάλια, καθώς επιτρέπει μεγαλύτερη ελευθερία στην επιλογή αδρανών. Η χρήση της ιπτάμενης τέφρας (flying ash) και της σκωρίας υψικαμίνων (blast furnace slag) ως αδρανή μειώνει την ανάγκη για τσιμέντο σε χαμηλή περιεκτικότητα αλκαλίων καθώς αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερη κατανάλωση ενέργειας. Υπολογίζεται εξοικονόμηση περίπου 2-5kcal/kg ανά ποσοστιαία μονάδα. Τυπικά, η παρακαμπτήρια δίοδος δεσμεύει το 10-70% των καυσαερίων της υψικαμίνου [212]. Επιπλέον, ηλεκτρική ενέργεια αποταμιεύεται εξαιτίας της αύξησης της παραγωγικότητας καθώς η σκόνη της υψικαμίνου καταλήγει ως κλίνκερ. Για ενδεικτικούς σκοπούς, υπολογίζεται ότι για 20% μείωση του όγκου των καυσαερίων στην παρακαμπτήρια οδό μπορεί να υπάρξει εξοικονόμηση 0,16-0,4 MBtu/ton κλίνκερ.

6.10.2 Ανάμεικτο τσιμέντο

Η παραγωγή του ανάμεικτου τσιμέντου (blended cement) περιλαμβάνει την πρόσμιξη στο κλίνκερ επιπλέον πρόσθετων υλικών όπως ιπτάμενη τέφρα, τέφρα ηφαιστειών, ποζολάνες, κοκκώδης σκωρία υψικαμίνων σε συγκεκριμένες αναλογίες. Η χρήση τέτοιου είδους τσιμέντου είναι ιδιαίτερα ελκυστική καθώς η ανάμειξη τσιμέντου με κάποια από τα παραπάνω πρόσθετα υλικά επιτρέπουν την μείωση της ενέργειας που χρησιμοποιείται καθώς και τις εκπομπές άνθρακα για την παραγωγή κλίνκερ.

Τα ανάμεικτα τσιμέντα χρησιμοποιήθηκαν αρχικά στις ΗΠΑ για την μείωση του κόστους παραγωγής και για την αύξησή της, τη μείωση των εκπομπών της καμίνου, χωρίς να επιβάλλεται κάποιο επιπλέον κόστος. Στην Ευρώπη έχουν αναπτυχθεί πάνω από 25 τύποι ανάμεικτου τσιμέντου χρησιμοποιώντας διαφορετικές συστάσεις και αναλογίες πρόσθετων υλικών.

Το ανάμεικτο τσιμέντο θα έχει λόγο κλίνκερ/τσιμέντου 65%. Η μείωση σε παραγωγή κλίνκερ ανέρχεται σε εξοικονόμηση σε κατανάλωση καυσίμου κατά 1,22 MBtu/ton. Σημειώνεται αύξηση στη χρήση καυσίμου κατά 0,08 MBtu/ton όσον αφορά την αφύγρανση της σκωρίας υψικαμίνου συνοδευόμενη όμως με εξοικονόμηση ενέργειας 0,17 MBtu/ton η οποία θα χρησιμοποιηθεί για την οδήγηση των καυσαερίων της καμίνου μέσω της παρακαμπτήριας διόδου για την απομάκρυνση της σκόνης πλούσιας σε αλκάλια. Η εξοικονόμηση ενέργειας ανέρχεται σε 4-10% Btu/lb ανά ποσοστιαία μονάδα που περνά από τη δίοδο αυτή [213]. Αυτό οφείλεται στο ότι το είδος αυτού του τσιμέντου επιβραδύνει την ανάπτυξη αντιδράσεων μεταξύ αλκαλίων-πυριτίων και κατ' επέκταση τη μείωση της ενέργειας που χρησιμοποιείται για την αντίδραση με σκοπό την απομάκρυνση αυτών. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται να αυξηθεί λόγω της ενέργειας που απαιτείται για την κοκκοποίηση της σκωρίας των υψικαμίνων.

Το κόστος για την προσθήκη πρόσθετων υλικών στο τσιμέντο ποικίλει. Το κόστος κεφαλαίου περιορίζεται στη δυναμικότητα αποθήκευσης για τα πρόσθετα υλικά. Η σκωρία υψικαμίνων από την άλλη, σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να χρειαστεί να αφυγρανθεί πριν χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή του τσιμέντου. Αυτό επιτελείται στους μύλους άλεσης που χρησιμοποιούν τα απαέρια των υψικαμίνων μέσω ενός αεριοστροβίλου ή ενός θερμαντήρα αέρα. Το κόστος λειτουργίας περιλαμβάνει το κόστος αγοράς των πρόσθετων υλικών συμπεριλαμβανομένου του κόστους μεταφοράς, το κόστος της επιπλέον ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται για την λεπτότερη άλεσή τους, το κόστος καυσίμου για την παραγωγή κλίνκερ, καθώς και το κόστος χειρισμού μηχανημάτων και το κόστος που απαιτείται για την εξόρυξη πρώτων υλών.

6.10.3 Ασβεστολιθικό τσιμέντο πόρτλαντ

Όπως και με το ανάμεικτο τσιμέντο, έτσι και στην περίπτωση αυτή αλεσμένος ασβεστόλιθος προστίθεται στο κλίνκερ για την παραγωγή τσιμέντου, μειώνοντας έτσι τις αυξημένες ανάγκες για την εξολοκλήρου παραγωγή κλίνκερ και μετέπειτα την ασβεστοποίηση. Αυτό έχει σαν συνέπεια να μειώσει τις ενεργειακές απαιτήσεις της καμίνου και της άλεσης του κλίνκερ, καθώς και τις εκπομπές CO₂. Η προσθήκη ασβεστόλιθου σε ποσοστό μεγαλύτερο του 5% έχει αποδειχθεί ότι επιδρά αρνητικά στις ιδιότητες του τσιμέντου, ενώ η χρήση του βέλτιστου ποσοστού βελτιώνει ελαφρώς τη λειτουργικότητά του [214]. Η προσθήκη ασβεστόλιθου σε ποσοστό 5% θα μείωνε την κατανάλωση καυσίμου κατά 5% ή κατά μέσο όρο 0,3MBtu/ton κλίνκερ, την κατανάλωση ισχύος που απαιτείται για την άλεση ασβεστόλιθου κατά 3kWh/ton τσιμέντου και τις εκπομπές CO₂ σχεδόν κατά 5%. Τα κόστη αποθήκευσης και διανομής είναι ελάχιστα συγκριτικά με την μείωση του κόστους λειτουργίας την υψικαμίνου (5%).

6.10.4 Μείωση της λεπτότητας για ιδιαίτερη χρήση

Η λεπτότητα του τσιμέντου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εφαρμογή. Για το λόγο αυτό δεν μπορεί να προσδιοριστεί αποτελεσματικά η βέλτιστη λεπτότητα του τσιμέντου. Όμως, η κατάλληλη λεπτότητα του τσιμέντου για κάποια συγκεκριμένη εφαρμογή μπορεί να επιφέρει μείωση στην ενέργεια που απαιτείται για την άλεση. Σε μεγάλο βαθμό παίζει ρόλο και η δυνατότητα που προσφέρει το τσιμέντο να αλεστεί. Πρέπει να σημειωθεί ότι όσο πιο λεπτό είναι το τσιμέντο για μια κατασκευή τόσο μειώνεται και η ποσότητα του σκυροδέματος για το συγκεκριμένο έργο και αυτό λόγω της μεγαλύτερης αντοχής. Είναι δύσκολο να εκτιμήσει κάποιος τη συνολική ενέργεια που εξοικονομείται εξαιτίας των πολλών παραγόντων που επηρεάζουν την αντοχή του σκυροδέματος και των πολλών παραμέτρων που πλαισιώνουν τη διαδικασία της άλεσης.

6.11 Εξελιγμένες τεχνικές βελτίωσης

6.11.1 Fluidized bed kiln

Πρόκειται για μία σύγχρονη μέθοδο παραγωγής κλίνκερ. Οι πρώτες προσπάθειες ανάπτυξης αυτής της μεθόδου έγιναν κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1950. Σήμερα, η ανάπτυξη αυτής της μεθόδου αναπτύσσεται κυρίως στην Ιαπωνία (Kawasaki Heavy Industries) και την Αμερική [215]. Στο σύστημα αυτό, το περιστροφικό τμήμα της παραδοσιακής καμίνου αντικαθίσταται από ένα σταθερό κάθετο κυλινδρικό δοχείο μέσα στο οποίο η πρώτη ύλη ασβεστοποιείται μέσω τη διαδικασία της

ύγρυνσης. Λόγω της υπερχειλίσης από την κορυφή του δοχείου το κλίνκερ ψύχεται στην ζώνη ψύξης. Το αναμενόμενο όφελος αυτής της τεχνολογίας είναι το μικρότερο κόστος κεφαλαίου λόγω της χρήσης μικρότερου εξοπλισμού, μικρότερες εκπομπές σε NO_x εξαιτίας των χαμηλότερων θερμοκρασιών και της ευρύτερης επιλογής σε καύσιμα, καθώς και λιγότερο ποσό κατανάλωσης ενέργειας. Η κατασκευή Kawasaki χρησιμοποιεί κυκλωνικό σύστημα προθερμαντήρων, μια τεχνολογία fluidized bed για προασβεστοποίηση και μία τεχνολογία fluidized bed για υγροποίηση. Έχει αποδειχθεί ότι αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί 10-15% λιγότερη ενέργεια από ένα συμβατικό σύστημα περιστροφικής καμίνου [216] και η κατανάλωση καυσίμου εκτιμάται να είναι μικρότερη από αυτή μιας συμβατικής καμίνου. Δεν υπάρχουν δεδομένα διαθέσιμα για την κατανάλωση ισχύος. Η χρήση, όμως, της τεχνολογίας fluidized bed πιθανόν να παρέχει κλίνκερ με λιγότερο αλκαλικό περιεχόμενο [217].

6.11.2 Εξελιγμένες τεχνολογίες λειοτρίβησης

Η λειοτρίβηση-άλεσμα (comminution) είναι ένα ενεργοβόρο στάδιο της παραγωγικής διαδικασίας. Παρόλα αυτά, οι υπάρχουσες τεχνολογίες άλεσης δεν είναι αποδοτικές. Πάνω από το 95% της ενέργειας που παρέχεται για την άλεση καταλήγει ως ανεκμετάλλευτη ενθαλπία. Μερική από την ενέργεια χρησιμοποιείται για την αφύγρυνση της φαρίνας ή για το τελικό άλεσμα, για παράδειγμα του ασβεστόλιθου. Οι ήδη υπάρχουσες διαδικασίες υψηλής πίεσης για την άλεση είναι πιο αποδοτικές συγκριτικά με τους σφαιρόμυλους. Αυξημένη απόδοση στην άλεση μπορούν να επιφέρουν οι μη-μηχανικές (non-mechanical) τεχνολογίες άλεσης όταν αυτές θα είναι διαθέσιμες [218]. Τα μη-μηχανικά συστήματα βασίζονται σε συστήματα υπερήχων [219], συστήματα laser και θερμικού ή ηλεκτρικού shock και κρυογενικής (cryogenics). Τέτοιου τύπου συστήματα δεν είναι ακόμη διαθέσιμα στην αγορά αλλά έχει αποδειχθεί ότι μπορούν να επιφέρουν τεράστιο θεωρητικό ενεργειακό όφελος.

Κεφάλαιο 7: Σύνοψη

Η τσιμεντοβιομηχανία αποτελεί μια από τις πιο ενεργοβόρες βιομηχανίες και ευθύνεται για το 5% των συνολικών εκπομπών CO₂ στον πλανήτη. Έχουν γίνει ήδη σημαντικές εξελίξεις για την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης της διαδικασίας παραγωγής τσιμέντου, ωστόσο υπάρχει περιθώριο για επιπλέον εξέλιξη στον τομέα των Best Available Techniques. Η συνεχής εξάντληση των ορυκτών καυσίμων κάνει όλο και πιο ελκυστική την προοπτική χρήσης εναλλακτικών καυσίμων στις βιομηχανίες σήμερα. Στην πρόταση αυτή έρχεται αντίθετη μία μεγάλη μερίδα του πληθυσμού, καθώς υποστηρίζει ότι η χρήση εναλλακτικών καυσίμων εγκυμονεί κινδύνους για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Συνεπώς, θα πρέπει να γίνει εκτενέστερη έρευνα στο θέμα των εναλλακτικών καυσίμων όσον αφορά την χρήση τους, ώστε να θεωρείται ορθολογική. Επιθυμητή είναι η τακτική ενημέρωση των πολιτών σχετικά με κάθε εξέλιξη στον τομέα.

Σημαντική εξέλιξη που αποσκοπεί στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας στην τσιμεντοβιομηχανία και του εκπεμπόμενου CO₂, αποτελεί η παραγωγή κλίνκερ με διαφορετική αναλογία πρώτων υλών από την τυπική. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το Aether[®] cement, το οποίο έχει πανομοιότυπες ιδιότητες με το τσιμέντο Portland. Η καινοτομία έγκειται στη χρήση μικρότερης ποσότητας ασβεστόλιθου καθώς και στη χαμηλότερη θερμοκρασία έψης του, οδηγώντας σε μείωση των εκπομπών CO₂ κατά 25-30%. Περεταίρω έρευνα πάνω στο θέμα πιθανόν να οδηγήσει σε ακόμη μεγαλύτερη μείωση ή και μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας.

Μία σχετικά νέα τεχνολογία η οποία υπόσχεται να μειώσει σημαντικά τα ποσά CO₂ που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα από τις βιομηχανίες που κάνουν χρήση ορυκτών καυσίμων, είναι η «Δέσμευση και αποθήκευση CO₂» (Carbon Capture and Storage - CCS). Κατά τη διαδικασία αυτή το CO₂ δεσμεύεται, πριν διαφύγει στην ατμόσφαιρα, και οδηγείται σε ειδικούς διαμορφωμένους χώρους κυρίως μέσα στο φλοιό της γης που καλούνται «geological formations». Η πρώτη προσπάθεια αξιοποίησης της τεχνολογίας CCS έγινε σε ένα εργοστάσιο παραγωγής ενέργειας στη Γερμανία τον Σεπτέμβριο του 2008 και οδήγησε σε μείωση εκπομπών CO₂ της τάξης του 80-90%. Ωστόσο, η τεχνολογία CCS δεν εφαρμόζεται εκτενώς γεγονός που υποδηλώνει την ανάγκη για περεταίρω έρευνα.

Από όλα τα παραπάνω καταλαβαίνει κανείς ότι προοπτικές για βελτίωση στην απόδοση της τσιμεντοβιομηχανίας υπάρχουν. Το ζητούμενο είναι η αξιοποίηση των κατάλληλων τεχνολογιών και η δημιουργία περιβαλλοντικής συνείδησης.

Κεφάλαιο 8: Αναφορές

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Κεφάλαιο 2°

[1]: Kosmatka, S., Kerkhoff, B., and Panarese, W.C. (2002). *Design and Control of Concrete Mixtures, 14th Ed.*, Portland Cement Association, Skokie, IL, USA

[7]: *Concrete, 2nd Edition* Sidney Mindess, University of British Columbia J. Francis Young, University of Illinois David Darwin, University of Kansas

[8], [9], [12]: Greer, W. L., Johnson, M. D., Morton, E.L., Raught, E.C., Steuch, H.E. and Trusty Jr., C.B., 1992. "Portland Cement," in *Air Pollution Engineering Manual*, Anthony J. Buonicore and Waynte T. Davis (eds.). New York: Van Nostrand Reinhold

[10]: EMEP, European Environmental Agency, *air pollutant guidebook, 2016*

[11]: Siegbert Sprung "Cement" in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 2012* Wiley-VCH, Weinheim

[14]: *United States Geological Survey, various years, Minerals Yearbook, Washington, D.C., USGS*

[16], [20]: *Al-Hussein Bin Talal University Faculty of Engineering Department Of Mining Engineering Cement Manufacturing Relationship between Mining and Cement Manufacturing Submitted to: Dr. Hani Alnawfleh By: Mo`men Mohsen Anwaar Yousef Al-Farayh p.18, December 2015*

[17]: CEMBUREAU (1997 November). "BAT for the cement industry, November 1997 / Information for cement and lime BREF 2001"

[23]: Austria, U. (1997). "Basic criteria for BAT cement/Information for cement and lime BREF 2001", UBA-IB-560 September 1997

Κεφάλαιο 3°

[32]: K.E Peray, *The Rotary Cement Kiln*, CHS Press, 1998, ISBN 978-0-8206-0367-4, Chapter 2, Hewlett op cit, pp 73-77

[33]: *Peray op cit, Hewlett op cit, pp 73,74,76*

[38]: *van Oss and Padovani, 2002. Personal Communication. U.S. Geological Survey, March – May 2002*

Κεφάλαιο 4^ο

[50]: *ÖKOPOOL Report, 1998, Economic evaluation of NOx abatement techniques in the European Cement*

[58]: *Informative Inventory Report 2017 Emissions of transboundary air pollutants in the Netherlands 1990-2015, B.A. Jimmink et. al*

[59]: *Cembureau, 1997. “Best Available Techniques for the Cement Industry,” Brussels: Cembureau; Informative Inventory Report 2017 Emissions of transboundary air pollutants in the Netherlands 1990-2015, B.A. Jimmink et. al*

[60]: *E. Robinson and R. C. Robbins, “Sources, Abundance and Fate of Gaseous Atmospheric Pollutants,” SRI Project PR-6755, Report for American Petroleum Institute, February 1968*

[61]: *Brandt and Heck, 1968. C.S. Brandt, W.W. Heck Effects of air pollutants on vegetation.*

[62]: *Stokinger and Coffin, 1968, Stokinger H.E., Coffin D.L. Biological effects of air pollutants Stern A.C*

[63]: *LIKENS, G. E. 1976. Acid precipitation. Chem. Eng. News*

[64]: *Lear, G. U.S. Environmental Protection Agency, Information retrieved from C. David Cooper, F.C. Alley, August 2000*

[65]: *U.S. Environmental Protection Agency. Research Summary – Acid Rain, EPA-600/8-79-082, Washington, D.C., October 1979*

[66]: *Bubenick, D.V, Record, F.A., and Kindya, R.J. Acid Rain an overview of the problem*

[67], [68]: *Goldsmith, G.R. “Effects of air pollution on human health” in air pollution, vol.I (2nd ed.), A.C. Stern, Ed. New York: Academic Press, 1968*

[69]: *Barnola, J.M., Raynaud, D., Korotkevich, Y.S., and Lorius, C., October 1987, p.329*

[1*]:

Proceedings of the PM emission inventories scientific workshop, Lago Maggiore, Italy, 18 October 2004. EUR 21302 EN, JRC, pp. 163–174

IPCC, 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. and Tanabe, K. (eds), *National Greenhouse Gas Inventories Programme*. IGES, Japan

Κεφάλαιο 5°

[76], [78]: *Cembureau, 1999, Climate Change: a message from Europe's cement industry*

[77]: *Alternative fuels in the cement industry, University of Vienna*

[79]: *Cembureau, March 2015*

[80]: *World Business Council For Sustainable Development, The cement sustainability initiative, July 2002*

[81]: *McIlveen-Wright DR, Huang Y, Rezvani S, Wang Y. A technical and environmental analysis of co-combustion of coal and biomass in fluidized bed technologies. Fuel 2007; 86:2032–42*

[82]: *Reijnders, L. (2007). "The cement industry as a scavenger in industrial ecology and the management of hazardous substances." Journal of Industrial Ecology*

[83], [84]: *Genon, G., Brizio, E. "Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF." Waste Management In Press, Corrected Proof, 2008*

[85], [87]: *World Business Council For Sustainable Development, The cement sustainability initiative, July 2002; European Commission (EC), 2004; Vallet, F., Resource Recovery Manager, personal communication: Murray, A. (January 26, 2007). Lafarge China cement manufacturing overview. Lafarge Shui On Cement, Chongqing, Sichuan Province, China.*

[86]: *Shih, P., Chang, J., Lu, H., Chiang, L. (2005). "Reuse of heavy metal-containing sludges in cement production." Cement and Concrete Research*

[88]: *Peltier, R. (2003). "Mercury removal standards are coming. Where's the technology? (Cover story)."; Reijnders, L. (2007). "The cement industry as a scavenger in industrial ecology and the management of hazardous substances." Journal of Industrial Ecology* [89]: *UNEP Chemicals, 2005*

[90], [95]: *Mokrzycki, E., A. Uliasz-Bochenczyk, et al. (2003). "Use of alternative fuels in the Polish cement industry."; UNEP Chemicals (2005). Standardized Toolkit for Identification and Quantification of Dioxin and Furan Releases. Geneva, Switzerland, United Nations Environment Programme Chemicals: 194;*

Harrell, M., *Manager of Alternative Fuel and Resource Recovery*, personal communication with A. Murray (March 4, 2008). *Use of alternative fuels by Ash Grove cement company*, Ash Grove Cement Company, Kansas

[91], [93]: Karstensen, K. (2008). "Formation, release and control of dioxins in cement kilns."

[92]: World Business Council For Sustainable Development, *The cement sustainability initiative*, July 2002;

Karstensen, K. (2008). "Formation, release and control of dioxins in cement kilns."

[94]: Singhi, M.K. and Bhargava, R. (2010), "Sustainable Indian cement industry", Workshop on International Comparison of Industrial Energy Efficiency, New Delhi, 27-28 January.

[96]: Seboka, Y. Getahun, M.A & Haile-Meskel, Y. (2009). *Biomass Energy for Cement Production: Opportunities In Ethiopia*. CDM Capacity Development in Eastern and Southern Africa. United Nations Development Programme

[97]: *Increasing the Use of Alternative Fuels at Cement Plants: International Best Practice*, 2017

[2*]: *Increasing the use of alternative fuels at cement plants: International best practice* (By International Finance Corporation 2017)

Κεφάλαιο 6°

[98]: Caffal, C. 1995. "Energy Management in Industry," *CADDET Analyses Series 17*, Sittard, The Netherlands: CADDET

[99]: *An ENERGY STAR Guide for Energy and Plant Managers*, 2008

[100]: United States Department of Energy (DOE) (2006). *Save Energy Now in Your Motor-Driven Systems*. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Industrial Technologies Program, Washington, D.C. Report DOE/GO-102006-2276

[101]: Holderbank Consulting, 1993. "Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada," CANMET, Ottawa, Ontario, Canada

[102]: Fujimoto, S., 1993. "Modern Technology Impact on Power Usage in Cement Plants," *Proc. 35th IEEE Cement Industry Technical Conference*, Toronto, Ontario, Canada, May 1993; Holderbank Consulting, 1993. "Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada," CANMET, Ottawa, Ontario, Canada

[103]: Fujimoto, S., 1993. "Modern Technology Impact on Power Usage in Cement Plants," *Proc. 35th IEEE Cement Industry Technical Conference*, Toronto, Ontario, Canada, May 1993

[104], [111], [115]: Holderbank Consulting, 1993. "Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada," CANMET, Ottawa, Ontario, Canada

[105], [106], [107], [108], [113], [116], [117], [118]: Cembureau, 1997. "Best Available Techniques for the Cement Industry," Brussels: Cembureau

[109]: Venkateswaran, S.R. and H.E. Lowitt, 1988. "The U.S. Cement Industry, An Energy Perspective", U.S. Department of Energy, Washington D.C., USA

[110]: De Hayes, L.J., 1999. "Flexibility, Availability and Maintenance Concept for the Quadropol," Polysius Teilt Mit No. 208, pp.33-38, Krupp Polysius, Germany

[112]: Martin, G. and S. McGarel, 2001b. "Automated Solution," International Cement Review, February 2001, pp.66-67

[114]: Holderbank Consulting, 1993. "Present and Future Energy Use of Energy in the Cement and Concrete Industries in Canada," CANMET, Ottawa, Ontario, Canada;

Süssegger, A., 1993. "Separator-Report '92" Proc. KHD Symposium '92, Volume 1 "Modern Roller Press Technology", KHD Humboldt Wedag, Cologne, Germany (1993)

[119], [120]: Energy Technology Support Unit, 1988. "High Level Control of a Cement Kiln," Energy Efficiency Demonstration Scheme, Expanded Project Profile 185, Harwell, United Kingdom

[121]: Martin, G. and S. McGarel, 2001. "Automation Using Model Predictive Control in the Cement Industry" Pavillion Technologies, Inc., Austin, TX (based on a paper published in International Cement Review, February 2001, pp.66-67)

[122]: Energy Technology Support Unit, 1988. "High Level Control of a Cement Kiln," Energy Efficiency Demonstration Scheme, Expanded Project Profile 185, Harwell, United Kingdom;
Ruby, C.W., 1997. "A New Approach to Expert Kiln Control." Proc.1997 IEEE/PCA Cement Industry Technical Conference XXXIX Conference Record, Institute of Electrical and Electronics Engineers: New Jersey

[123]: Martin, G., T. Lange, and N. Frewin, 2000. "Next Generation Controllers for Kiln/Cooler and Mill Applications based on Model predictive Control and Neural Networks," Proceedings IEEE- IAS/PCA 2000 Cement Industry Technical Conference, Salt Lake City, UT, May 7th – 12th, 2000

[124], [125]: Martin, G. and S. McGarel, 2001. "Automation Using Model Predictive Control in the Cement Industry" Pavillion Technologies, Inc., Austin, TX (based on a paper published in *International Cement Review*, February 2001, pp.66-67)

[126], [127], [138]: Venkateswaran, S.R. and H.E. Lowitt, 1988. "The U.S. Cement Industry, An Energy Perspective", U.S. Department of Energy, Washington D.C., USA

[128]: Lowes, T.M. and Bezant, K.W., 1990. "Energy Management in the UK Cement Industry" *Energy Efficiency in the Cement Industry* (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied Science

[129]: Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADDET), International Energy Agency, 1997. "Revolutionary low-NOx high-efficiency gas burner," Sittard, The Netherlands: CADDET

[130]: Videgar, R., Rapson, D. and Dhanjal, S., 1997. "Gyro-therm Technology Boosts Cement Kiln Output, Efficiency and Cuts NOx Emissions." *Proc.1997 IEEE/PCA Cement Industry Technical Conference XXXIX Conference Record*, Institute of Electrical and Electronics Engineers: New Jersey

[131], [132]: Smart, J. and B. Jenkins, 2000. "Combustion in the Rotary Kiln", *The Combustion Institute*, Leeds, UK

[133]: Mayes, G., 2001. "Oxygen Enrichment at the TXI Midlothian Cement Plant" *Proc.2001 IEEE- IAS/PCA Cement Industry Technical Conference*, pp.289-292;

Gotro, C.A., 2001. "Oxygen Enrichment at Cemex's Victorville Plant" *Proc.2001 IEEE- IAS/PCA Cement Industry Technical Conference* pp. 281-287

[134]: Leger, C.B., and J.G. Friday, 2001. "Oxygen Enrichment for Cement Kiln Firing" *Proc. 2001 IEEE- IAS/PCA Cement Industry Technical Conference*, pp. 271-278

[135], [136]: Shafer, B., 2001. "Oxygen Enrichment at California Portland Cement Company's Mojave Plant" *Proc 2001. IEEE- IAS/PCA Cement Industry Technical Conference*, pp. 293-299;

Gotro, C.A., 2001. "Oxygen Enrichment at Cemex's Victorville Plant" *Proc.2001 IEEE- IAS/PCA Cement Industry Technical Conference* pp. 281-287

[137]: Canadian Lime Institute, 2001. "Energy Efficiency Opportunity Guide in the Lime Industry," *Office of Energy Efficiency*, Natural Resources Canada, Ottawa, ON

- [139]: Lowes, T.M. and Bezant, K.W., 1990. "Energy Management in the UK Cement Industry" *Energy Efficiency in the Cement Industry* (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied Science;
- COWIconsult, March Consulting Group and MAIN, 1993. "Energy Technology in the Cement Industrial Sector", Report prepared for CEC - DG-XVII, Brussels, April 1992;
- Venkateswaran, S.R. and H.E. Lowitt, 1988. "The U.S. Cement Industry, An Energy Perspective", U.S. Department of Energy, Washington D.C., USA
- [140]: Lesnikoff, G. 1999. *Hanson Cement, Cupertino, CA, personal communication*
- [141]: Schmidt, H-J., 1998. "Chrome Free Basic Bricks – A Determining Factor in Cement Production" *Proc.1998 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference*, pp.155-167;
- van Oss, H., 2002. *Personal Communication. U.S. Geological Survey, March – May 2002*
- [142], [143]: Regitz, John, 1996. "Evaluation of Mill Drive Options" *IEEE Transactions on Industry Applications* 3 32, pp. 653
- [144]: Holland, M., 2001. "AC DC Kilns," *Proc. 2001 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference*, pp. 75- 84
- [145]: Dolores, R. and M.F. Moran, 2001. "Maintenance and Production Improvements with ASDs" *Proc.2001 IEEE-IAS/PCA Cement Industry Technical Conference*, pp. 85-97
- [146]: Fujimoto, S., 1994. "Modern Technology Impact on Power Usage in Cement Plants," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 30, No. 3., June
- [147], [152], [216]: Vleuten, F.P. van der, 1994. "Cement in Development: Energy and Environment" *Netherlands Energy Research Foundation, Petten, The Netherlands*
- [148]: Cembureau, 1997. "Best Available Techniques for the Cement Industry," *Brussels: Cembureau*
- [149], [161], [162]: COWIconsult, March Consulting Group and MAIN, 1993. "Energy Technology in the Cement Industrial Sector", Report prepared for CEC - DG-XVII, Brussels, April 1992
- [150]: Alsop, P.A. and J.W. Post, 1995. *The Cement Plant Operations Handbook, (First edition), Tradeship Publications Ltd., Dorking, UK*

[151]: COWIconsult, March Consulting Group and MAIN, 1993. "Energy Technology in the Cement Industrial Sector", Report prepared for CEC - DG-XVII, Brussels, April 1992;
Vleuten, F.P. van der, 1994. "Cement in Development: Energy and Environment" Netherlands Energy Research Foundation, Petten, The Netherlands

[153]: Jacquard, M.K. & Associates and Willis Energy Services Ltd., 1996. *Industrial Energy End-Use Analysis and Conservation Potential in Six Major Industries in Canada*. Report prepared for Natural Resources Canada, Ottawa, Canada

[154], [159]: Cembureau, 1997. "Best Available Techniques for the Cement Industry," Brussels: Cembureau

[155], [156], [157]: Grydgaard, P., 1998. "Get out of the Wet," *International Cement Review*, April 1998
Haspel, D., and W. Henderson, 1993. "A New Generation of Process Optimisation Systems," *International Cement Review*, June 1993, pp.71-73 (1993)

[158]: Worrell, E., L. Price, N. Martin, C. Hendriks and L. Ozawa Meida, 2001. "Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry," *Annual Review of Energy and the Environment* 26 pp.303-329

[160], [168]: COWIconsult, March Consulting Group and MAIN, 1993. "Energy Technology in the Cement Industrial Sector", Report prepared for CEC - DG-XVII, Brussels, April 1992;
Venkateswaran, S.R. and H.E. Lowitt, 1988. "The U.S. Cement Industry, An Energy Perspective", U.S. Department of Energy, Washington D.C., USA

[161], [162]: COWIconsult, March Consulting Group and MAIN, 1993. "Energy Technology in the Cement Industrial Sector", Report prepared for CEC - DG-XVII, Brussels, April 1992

[163], [166]: Jacquard, M.K. & Associates and Willis Energy Services Ltd., 1996. *Industrial Energy End-Use Analysis and Conservation Potential in Six Major Industries in Canada*. Report prepared for Natural Resources Canada, Ottawa, Canada

[164]: Birch, E., 1990. "Energy Savings in Cement Kiln Systems" *Energy Efficiency in the Cement Industry* (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied Science (pp.118-128)

[165]: Scheuer, A. and Sprung, S., 1990. "Energy Outlook in West Germany's Cement Industry" *Energy Efficiency in the Cement Industry* (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied

Science, 1990;

Steinbliss, E., 1990. "Traditional and Advanced Concepts of Waste Heat Recovery in Cement Plants" Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied Science;

Neto, M., 1990. "Waste Gas Heat Recovery in Cement Plants" Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied Science

[167] : *United States Geological Survey, various years, Minerals Yearbook, Washington, D.C., USGS*

[169]: *van den Broeck, M., 1999. "GO Control Goes 'Multi-Circuit'" International Cement Journal 1, pp.35-37 (1999) [170]: Goebel, 2001)*

[171]: *Martin, G. and S. McGarel, 2001. "Automation Using Model Predictive Control in the Cement Industry" Pavillion Technologies, Inc., Austin, TX (based on a paper published in International Cement Review, February 2001, pp.66-67)*

[172]: *Martin, G., S. McGarel, T. Evans, and G. Eklund, 2001. "Reduce Specific Energy Requirements while Optimizing NOx Emissions Decisions in Cement with Model Predictive Control," Personal Communication from Pavilion Technologies, Inc., Austin, TX, December 3rd, 2001*

[173]: *Marchal, G. 1997. "Industrial Experience with Clinker Grinding in the Horomill" Proc.1997 IEEE/PCA Cement Industry Technical Conference XXXIX Conference Record, Institute of Electrical and Electronics Engineers: New Jersey;*
Cembureau, 1997. "Best Available Techniques for the Cement Industry," Brussels: Cembureau

[174]: *Alsop, P.A. and J.W. Post, 1995. The Cement Plant Operations Handbook, (First edition), Tradeship Publications Ltd., Dorking, UK;*
Cembureau, 1997. "Best Available Techniques for the Cement Industry," Brussels: Cembureau;
Seebach, H.M. von, E. Neumann and L. Lohnherr, 1996. "State-of-the-Art of Energy-Efficient Grinding Systems" ZKG International 2 49 pp.61-67 (1996)

[175]: *Cembureau, 1997. "Best Available Techniques for the Cement Industry," Brussels: Cembureau;*
Alsop, P.A. and J.W. Post, 1995. The Cement Plant Operations Handbook, (First edition), Tradeship Publications Ltd., Dorking, UK

[176], [177], [179], [180]: Buzzi, S., 1997. "Die Horomill® - Eine Neue Mühle für die Feinzerkleinerung," ZKG International 3 50 pp.127-138 (1997)

[178]: Marchal, G. 1997. "Industrial Experience with Clinker Grinding in the Horomill" Proc.1997 IEEE/PCA Cement Industry Technical Conference XXXIX Conference Record, Institute of Electrical and Electronics Engineers: New Jersey

[181]: Parkes, F.F., 1990. "Energy Saving by Utilisation of High Efficiency Classifier for Grinding and Cooling of Cement on Two Mills at Castle Cement (Ribblesdale) Limited, Clitheroe, Lancashire, UK" Energy Efficiency in the Cement Industry (Ed. J. Sirchis), London, England: Elsevier Applied Science

[182]: Salzborn, D. and A. Chin-Fatt, 1993. "Operational Results of a Vertical Roller Mill Modified with a High Efficiency Classifier" Proc. 35th IEEE Cement Industry Technical Conference, Toronto, Ontario, Canada, May 1993.

Sauli, R.S., 1993. "Rotary Kiln Modernization and Clinker Production Increase at Testi Cement Plant of S.A.C.C.I. Spa., Italy" Proc. KHD Symposium '92, Volume 2 "Modern Burning Technology", KHD Humboldt Wedag, Cologne, Germany;

Süssegger, A., 1993. "Separator-Report '92" Proc. KHD Symposium '92, Volume 1 "Modern Roller Press Technology", KHD Humboldt Wedag, Cologne, Germany (1993)

[183], [184]: Venkateswaran, S.R. and H.E. Lowitt, 1988. "The U.S. Cement Industry, An Energy Perspective", U.S. Department of Energy, Washington D.C., USA

[185]: Southern California Edison (SCE) (2003). Southern California Edison Educational Publication: Saving Money with Motors in Pharmaceutical Plants. Rosemead, California

[186], [187]: Motor Decisions Matter (MDM) (2007). Motor Planning Kit. Boston, Massachusetts

[188]: Electric Apparatus Service Association (EASA) (2003). The Effect of Repair/Rewinding on Motor Efficiency. St. Louis, Missouri

[189]: Efficiency Partnership (2004). Industrial Product Guide – Manufacturing and Processing Equipment: Compressed Air Equipment. Flex Your Power, San Francisco, California

[190]: Xenergy 1998

[191]: Worrell, E., L. Price, N. Martin, C. Hendriks and L. Ozawa Meida, 2001. "Carbon Dioxide Emissions from the Global Cement Industry," *Annual Review of Energy and the Environment* 26 pp.303-329

[192], [193], [202], [206], [207]: Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) and Resource Dynamics Corporation, 1998. "Improving Compressed Air System Performance, a Sourcebook for Industry," prepared for the U.S. Department of Energy, Motor Challenge Program, Berkeley, CA: LBNL

[194], [197], [201], [204], [208]: Radgen, P. and E. Blaustein (eds.), 2001. "Compressed Air Systems in the European Union, Energy, Emissions, Savings Potential and Policy Actions," Fraunhofer Institute for Systems Technology and Innovation, Karlsruhe, Germany

[195]: Ingersoll Rand, 2001. "Air Solutions Group—Compressed Air Systems Energy Reduction Basics", June 2001

[196]: Ingersoll Rand, 2001. "Air Solutions Group—Compressed Air Systems Energy Reduction Basics," <http://www.air.ingersoll-rand.com/NEW/pedwards.htm>. June 2001;

Price, A. and M.H. Ross, 1989. "Reducing Industrial Electricity Costs – an Automotive Case Study," *The Electricity Journal*. July: 40-51

[198], [203]: Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADDET), International Energy Agency, 1997b. "Saving Energy with Efficient Compressed Air Systems," *Maxi Brochure 06, Sittard, The Netherlands*

[199]: Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies (CADDET), International Energy Agency, 1997b. "Saving Energy with Efficient Compressed Air Systems," *Maxi Brochure 06, Sittard, The Netherlands*;

Parekh, P., 2000. "Investment Grade Compressed Air System Audit, Analysis, and Upgrade," In: *Proceedings 22nd National Industrial Energy Technology Conference Proceedings*. Houston, Texas. April 5-6: pp 270-279

[200]: Ingersoll Rand, 2001. "Air Solutions Group—Compressed Air Systems Energy Reduction Basics", June 2001

[205]: Parekh, P., 2000. "Investment Grade Compressed Air System Audit, Analysis, and Upgrade," In: *Proceedings 22nd National Industrial Energy Technology Conference Proceedings*. Houston, Texas. April 5-6: pp 270-279

[209]: Price, A. and M.H. Ross, 1989. "Reducing Industrial Electricity Costs – an Automotive Case Study," *The Electricity Journal*. July: 40-51

[210]: Martin, G., T. Lange, and N. Frewin, 2000. "Next Generation Controllers for Kiln/Cooler and Mill Applications based on Model predictive Control and Neural Networks," *Proceedings IEEE- IAS/PCA 2000 Cement Industry Technical Conference, Salt Lake City, UT, May 7th – 12th, 2000*

[211]: EPA, 2001

[212], [213]: Alsop, P.A. and J.W. Post, 1995. *The Cement Plant Operations Handbook, (First edition), Tradeship Publications Ltd., Dorking, UK*

[214]: Detwiler, R.J. and P.D. Tennis, 1996. "The Use of Limestone in Portland Cement: a State-of-the-Art Review," Skokie, IL: Portland Cement Association

[215]: Cohen, S.M., 1995. "Anwendungsmöglichkeiten der Wirbelschicht bei der Zementherstellung" *Zement-Kalk-Gips* 1 48 pp.8-16 (1995);
Van Kuijk, A.H.J., A.M. Schakel and P. Vissers, 1997. "Dutch Notes on BAT for the Production of Cement Clinker", Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, The Hague, The Netherlands

[217]: Cohen, S.M., 1992. "Fluid Bed Cement Clinker Applications," *Proc. 1992 IEEE Cement Industry Technical Conference XXXIV, Dallas, TX, May 10-14, 1992, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. New York, NY, USA (pp.279-301)*

[218]: Office of Technology Assessment, 1993. "Industrial Energy Efficiency" (OTA Report E-560), Washington, D.C., USA

[219]: Suzuki, K., H. Tochinai, T. Uematsa, and S. Mishiro, 1993. "A New Grinding Method for Ceramics Using a Biaxially Vibrated Nonrotational Ultrasonic Tool" *CIRP Annuals* 1 42 pp.375-378 (1993)

Διαδικτυακές Αναφορές

Κεφάλαιο 2ο

[2], [3]: civiltoday.com

[4]: http://www.concreteconstruction.net/how-to/efflorescence-causes-and-solutions_o

[5]: civiltoday.com/civil-engineering-materials/cement/10-cement-ingredients-with-functions

[6]: www.engr.psu.edu/ce/courses/ce584/concrete/library/construction/curing/Composition%20of%20cement.htm

[13]: <http://www.alcox.in/blog/clinker-storage/>

[15]: cementkilns.co.uk/long_wet_kilns.html

[18]: https://en.wikipedia.org/wiki/Cement_kiln#/media/File:CemKilnSP4.jpg

[19]: https://en.wikipedia.org/wiki/Cement_kiln#/media/File:LDCement2StringPH.jpg

[21]: http://www.cementkilns.co.uk/lepol_kilns.html

[22]: http://www.zkg.de/en/artikel/zkg_Multi-criteria_decision-making_model_for_establishing_the_optimal_typology_2273460.html

Κεφάλαιο 3°

[24]: <http://www.ballmillfactory.com/crusher-screening-plant/jaw-crusher.html>

[25]: <https://ardra.biz/sain-teknologi/mineral/pengolahan-mineral/operasi-peremukan-crushing/>

[26]: http://www.directindustry.fr/prod/satrindtech-srl/product-51431-1848293.html?utm_source=ProductDetail&utm_medium=Web&utm_content=SimilarProduct&utm_campaign=CA

[27]: <https://www.williamscrusher.com/products/roll-crushers#288665-single-vs-double>

[28]: <https://www.ikn.eu/cool-down/pendulum-cooler/roll-crusher/>

[29]: https://www.alibaba.com/product-detail/HSM-Stone-Crusher-Hammer-Crusher-Machine_60397298265.html

[30]: <http://www.briquettemachinery.com/crushing-equipments/hammer-crusher.html>

[31]: *Originally from en.wikipedia, Author: LinguisticDemographer*

[34]: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/92/CemKilnSP4.jpg>

[35]: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/92/CemKilnSP4.jpg>

[36]: http://www.cementkilns.co.uk/precalciner_kilns.html

[37]: <http://www.cementequipment.org/roots-blower/precalciner-principlestypesmanufacturersmodels>

[39]: http://www.cementkilns.co.uk/cooler_grate.html

[40]: <http://www.cementequipment.org/roots-blower/grate-cooler/>

[41]: http://www.cementkilns.co.uk/cooler_grate.html

[42]: http://www.cementkilns.co.uk/cooler_grate.html

[43]: PDF :Clinker Coolers, <http://222.255.19.250/picture/PRJ-MEC/VAN/Holcim/Clinker%20Coolers.pdf>

[44]: <http://www.estandacom.com/en/coolers>

[45]: <https://maulhidayat.wordpress.com/2013/01/15/cooler-system/>

[46]: <https://www.linkedin.com/pulse/ball-mill-highly-efficient-grinding-milling-machine-evita-lee>

[47]: <http://www.kysteelballs.com/newsblog/effect-grinding-media-balls-ball-mill-output>

[48]: <http://www.cementequipment.org/home/cement-grinding-system/important-figures-cement-grinding/>

[49]: <http://www.cementequipment.org/home/cement-grinding-system/cement-inding-ball-mill-systems/>

Κεφάλαιο 4^ο

[51], [52], [53], [54], [55], [56], [57]: EEA, 2017a, 'Air Quality e-Reporting Database', European Environment Agency (<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/aqereporting-2>) accessed 19 July 2017

[70]: EPA nventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990-2015, (<https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>)

[71]: <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/history/>

[72]: EEA report

[73]: Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), http://cdiac.ornl.gov/CO2_Emission/

[74]: EU,2004,2008

[75]: WHO, 2000, 2006a

[1*]: US EPA, 2011. SPECIATE database version 4.3, U.S. Environmental Protection Agency's (EPA). Available at: <http://cfpub.epa.gov/si/speciate/> [Accessed 5 June 2013]