

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტი

ხელნაწერის უფლებით

ვახტანგ ჩხეიძე

ადგილობრივი ნედლეულის გარდაქმნის პროცესების შესწავლა
რეაქტორ-დეკარბონიზატორიან მბრუნავ ლუმელში ცემენტის
კლინკერის წარმოების პირობებში

სადოქტორო პროგრამა: ქიმიური და ბიოლოგიური ინჟინერია

შიფრი: 0711

დოქტორის აკადემიური ხარისხის მოსაპოვებლად

წარდგენილი დისერტაციის

ა ვ ტ ო რ ე ფ ე რ ა ტ ი

თბილისი

2023 წელი

სამუშაო შესრულებულია საქართველოს ტექნიკურ უნივერსიტეტი
ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტი
ქიმიური და ბიოლოგიური ტექნოლოგიების დეპარტამენტი

ხელმძღვანელი: პროფესორი თამაზ გაბადაძე

რეცენზენტები:
.....

დაცვა შედგება 2023 წლის ” ” , საათზე

საქართველოს ტექნიკური უნივერსიტეტის ქიმიური ტექნოლოგიისა
და მეტალურგიის ფაკულტეტის სადისერტაციო ნაშრომის დაცვის
კოლეგიის სხდომაზე

კორპუსი , აუდიტორია

მისამართი: 0160, თბილისი, №

დისერტაციის გაცნობა შეიძლება სტუ-ის ბიბლიოთეკაში,

ხოლო ავტორეფერატისა – ფაკულტეტის ვებგვერდზე

ფაკულტეტის სწავლული მდივანი

თემის აქტუალობა: თანამედროვე პირობებში CO₂-ის გამონაბოლქვის შემცირება უმნიშვნელოვანესი საკითხი გახდა ცემენტის და ნებისმიერი სხვა ინდუსტრიული მასშტაბის წარმოებისთვის. ამჟამად ითვლება, რომ CO₂-ის გლობალური წარმოშობის 36% მოდის ინდუსტრიულ სექტორზე, ხოლო ამ სექტორის 19% კი ბეტონის, ანუ კლინკერით და ცემენტით შექმნილი საბოლოო პროდუქტის, წილია.

კლინკერიზაციის პროცესი სრულად შესწავლილი არაა მისი კომპლექსურობიდან და მბრუნავ აგრეგატში მიმდინარე მაღალ ტემპერატურული პროცესებიდან გამომდინარე. თუმცა კლინკერიზაციის პროცესი არის CO₂-ის ყველაზე დიდი წარმომქმნელი, მაგრამ ასევე ცემენტში ყველაზე დიდი წილი კლინკერს უჭირავს (ყველა ტიპის ცემენტის წარმოებაში საქართველოში საშუალოდ 80% კლინკერი გვჭირდება), შესაბამისად გამოდის, რომ ცემენტის საწარმოებლად ვუშვებთ კლინკერს, რომელიც CO₂-ის გამონაბოლქვის ძირითადი წყაროა. კლინკერის წილის შემცირება სტანდარტულ პირობებში იწვევს ცემენტის მარკიანობის ანუ სიმტკიცის შემცირებას. იმისათვის რათა ცემენტის ხარისხი შეესაბამებოდეს თანამედროვე სტანდარტებს აუცილებელია კლინკერის ზემოთ ხსენებული პროცენტულობა შევინარჩუნოთ.

ნაშრომის ძირითადი მიზნები იყო ზეგავლენა მოგვეხდინა კლინკერის და ცემენტის წარმოების პროცესებზე ეკონომიური და ეკოლოგიური კუთხით, ასევე შეგვესწავლა და დაგვეხვეწა ახლად დანერგული ნედლეული და საწვავი მასალების მიქსები. მთავარი ნედლეულის - სასხორის კირქვის გამოყენებით პირველად მოხდა კლინკერის წარმოება მშრალი ციკლის 5 სართულიანი თბომცვლელის, რეაქტორ დეკარბონიზატორის და მბრუნავი ღუმელის გამოყენებით.

ამასთანავე, მოხდა ტუფის თერმული აქტივაცია ცეცხლრიკა მაცივარში და ამ ექსპერიმენტისგან გლობალური მასშტაბის შედეგი იქნა მიღებული ტუფის - ცემენტის დანამატის გააქტიურების შედეგად, რომელმაც ნაწილობრივ და სრულფასოვნად ჩაანაცვლა კლინკერი და აქედან გამომდინარე CO₂-ის გამონაბოლქვი და კლინკერის სხვა დანახარჯები დაახლოებით 5-10%-ით შეამცირა.

კლინკერის წილის შემცირება მხოლოდ იმ პირობებში იქნებოდა შესაძლებელი, ცემენტის სიმტკიცის დაკლების გარეშე, რომ თვითონ კლინკერი ან დანამატი იყოს გაცილებით მეტი აქტიურობის და შესაბამისად მეტი სიმტკიცის მატარებელი. კლინკერის გააქტიურება და მასზე ნაკლები თბური დანახარჯის გაწევა განხილულ იქნა ზედა ქვეთავებში, რომელის გავლენის მასშტაბი კლინკერზე არის დაახლოებით 2%-მდე, ხოლო დანამატის გააქტიურება და ამით ცემენტის სიმტკიცის გაზრდა შედარებით უფრო დიდ გავლენას მოახდენს საერთო ცემენტის დანახარჯებსა და ხარისხზე.

მეცნიერული სიახლე: კლინკერის და ცემენტის წარმოების ხარჯების და გამონაბოლქვის შემცირება საკმაოდ ვრცელი და კომპლექსური საკითხებია, რომლებზე მუშაობაც განგრძობითად მიმდინარეობს კლინკერის პირველი ლუმელის მონტაჟიდან დღემდე. ამ კვლევების და გაუმჯობესების მიზნის შედეგად შეიცვალა გამოწვის მეთოდები, შესაბამისად შემცირდა თბური ხარჯი, CO₂-ის გამონაბოლქვი და გაიზარდა წარმადობა.

შეცვლილი მეთოდი, ნედლეული და საწვავი მიქსები დიდ გავლენას ახდენენ არა მხოლოდ დანახარჯებსა და CO₂-ის ემისიებზე არამედ კლინკერის ხარისხზეც. ნედლეულის ან საწვავის ახალი წყაროს გამოყენება უნდა შესწავლილ იქნას როგორც დანახარჯებთან, ასევე პროცესის მართვის და კლინკერის აქტიურობასთან და სხვა ხარისხობრივი პარამეტრებთან მიმართებაში.

ნაშრომის მეცნიერული სიახლე წარმოადგენს კვლევებს და მათ შედეგებს სასხორის და დედოფლისწყაროს კირქვების, რკინის კეკის, ალოქსიდის და ქართული ნახშირის და მათი სხვადასხვა პროპორციების გამოყენება ახალ მშრალი მეთოდის რეაქტორ-დეკარბონიზატორიან მბრუნავ ლუმელზე. მშრალი მეთოდის ლუმელი კასპის ცემენტის ქარხანაში ჩაეშვა ექსპლუატაციაში 2018 წელს შესაბამისად და როდესაც სასხორის კირქვის კარიერი ახალი გახსნილი იყო (კავთისხევის კირქვის მარაგის ამოწურვის გამო) შესაბამისად ამ ნედლეული მასალების ნარევი ჯერ არ გამოყენებული კლინკერის წარმოებაში და შესწავლილი არ ყოფილა.

პუცოლანური დანამატით კლინკერი გარკვეული ნაწილის ჩანაცვლება არის ერთერთი მეთოდი თუ როგორ შევამციროთ დეკარბონიზაციის თერმული ხარჯი და ამ რექციის დროს გამოყოფილი CO₂. ტუფის თერმული აქტივაცია მიღებული მიდგომაა, ამ დანამატის აქტიურობის გასაზრდელად, მაგრამ ამ აქტივაციის მისაღწევად ასევე საჭიროა თერმული დანახარჯი. რადგან სრული აქტივაცია ითხოვთ მასალის გახურებას 700-800°C გრადუსზე თერმული ხარჯი, გახურების მეთოდიდან გამომდინარე, 1 ტონა მასალის აქტივაცია დაახლოებით 2-3 გჯ. ენერჯიას მოითხოვს, რაც შესაბამისად წარმოადგენს მუდმივ ხარჯს და საწვავის წვის დროს გამოყოფილ მუდმივ ემისიას. ხოლო იმისათვის რომ აქტივაციის პროცესი ვაწარმოვოთ საჭიროა მოწყობილობა, რომელის მონტაჟიც დაახლოებით 10 მილიონი ლარი ჯდება.

თბური დანახარჯების და დამატებითი ემისიების თავიდან ასაცილებლად, მოხდა პროცესების სრული შესწავლა, რა დროსაც გამოიკვეთა კლინკერის მაცივარში არსებული ტემპერატურული პროფილის შესაბამისი პირობები ტუფის აქტივაციისათვის. მოხდა ლაბორატორიული და შემდგომ უკვე საწარმოო ექსპერიმენტის ჩატარება და შედეგად მივიღეთ ნულოვანი თბური ხარჯით და გამონაბოლქვით გააქტიურებული პუცოლანური მასალა ტუფი, რომელიც 5-10%-ით სრულფასოვნად ანაცვლებს კლინკერს მისი ხარისხის გაუმჯობესებით ან გაზრდით.

სამუშაოს მიზანი: ცემენტის და კლინკერის წარმოებისთვის ყოველთვის აქტუალური იყო დანახარჯების შემცირება, ნამწვი ჰაერების ანუ ემისიების შემცირება და ხარისხის სტაბილური გაზრდა. თანამედროვე მსოფლიოში CO₂-ის გამონაბოლქვის შემცირებაზე ყურადღება განსაკუთრებითაა გამახვილებული, გლობალური დათბობის და სხვა ბევრი გარემოს დაცვითი საკითხების აქტუალობიდან გამომდინარე. არსებული გამოწვევებიდან გამომდინარე სადოქტორო ნამუშევრის ძირითად მიზნები იყო:

-სველი მეთოდის, გრძელი მბრუნავი ღუმელების მშრალი მეთოდის, რეაქტორ-დეკარბონიზატორიანი ღუმელით ჩანაცვლება, კლინკერის ხარისხის გაზრდის ან შენარჩუნების პირობებში

-კავთისხევის კირქვის კარიერის ამოწურვის გამო, მთავარი ნედლეულის წყაროს ჩანაცვლება

-საწვავის რაოდენობის და ჩამჯდარი ნაცრის გავლენის შესწავლა და საუკეთესო მიქსის შერჩევა

-ნედლეული კომპონენტების სხვადასხვა მიქსების გამოცდა და საუკეთესო მიქსის დადგენა

-ნედლეული ფქვილის და საწვავის კლინკერად გარდაქმნის პროცესის შესწავლა

-პუცოლანური დანამატის - ტუფის გააქტიურება კლინკერის მაცივარში

სველი მეთოდიდან მშრალ მეთოდზე გადასვლა მოხდა ისე, რომ კლინკერის დაფქვადობა გაიზარდა, კლინკერის სიმტკიცე იგივე ან გაზრდილია შედარებით ნაკლები LSF-ის კოეფიციენტით, სითბური ხარჯი ტონა კლინკერზე შემცირდა 2-ჯერ და წარმადობა გაიზარდა 2-ჯერ (ერთად აღებულ 3 სველ ღუმელთან მიმართებაში).

კავთისხევის კარიერის გადართვით გამოწვეული სირთულეები მოგვარებულ იქნა, სასხორის კირქვასთან ერთად გამამდიდრებლად გამოყენებულ იქნა დედოფლის წყაროს კირქვა რომლის 95%-ზე მეტი კალციუმის კარბონატია. ეს ჩანაცვლება მოხდა ისე, რომ კლინკერის ხარისხზე უარყოფითი გავლენა არ ჰქონია და პირიქით იგივე უფრო მეტად სტაბილური და აქტიური გახადა.

ნახშირის და შესაბამისად ნაცრის 2-ჯერ შემცირების შემდეგ ნედლეული ფქვილის ქიმია გადაითვალა ისე რომ კლინკერის ხარისხი იყო იგივე ან გაზრდილი. შესაბამისი გადათვლა ხდებოდა ცდების ყველა ეტაპზე.

კლინკერის ახალი მეთოდით გამოწვის პროცესი შესწავლილი და ოპტიმიზირებული იქნა. ნედლეულის და საწვავის გადანაწილების 20 ინდუსტრიული ექსპერიმენტის შედეგად დადგინდა საუკეთესო მიქსები, რომელთა საშუალებით კლინკერის ხარისხი იზრდება ან იგივე რჩება, ხოლო თბური დანახარჯი, საწვავის და ნედლეული ფქვილისგან მიღებული CO₂-ის ემისიები კი შემცირდა.

ყველაზე მნიშვნელოვანი მიღწევა იყო ტუფის თერმული აქტივაცია, რომელიც წარმატებით დამთავრდა უკვე არა მხოლოდ ლაბორატორიული არამედ

ინდუსტრიული ექპერიმენტითაც. ინოვაციური იდეის საწყისი ის იყო რომ ფიზიკურად შეკავშირებული წყლის გამოდევნა (გამოშრობა) პუცოლანურ მასალას გაცილებით აქტიურს ხდის და მისი 10%-მდე მოხმარება კლინკერთან მიმართებაში არამხოლოდ ინარჩუნებს არამედ ზრდის კიდეც ამ მიქსის სიმტკიცეს კლინკერთან შედარებით.

არსებული პუცოლანური მასალის გააქტიურების მეთოდი შესწავლილი იყო ადრეული 70-იანი წლებიდან მოყოლებული. თუმცა პუცოლანური დანამატის გააქტიურებას სჭირდება არანაკლები თბური ენერგია გასახერხებლად ვიდრე კლინკერს და შესაბამისად ისიც გამოყოფს დამატებით CO₂-ის ემისიებს. ამიტომ სტანდარტული მიდგომით გააქტიურებული პუცოლანური მასალა შედარებით ნაკლებად ამცირებს გამონაბოლქვს, თერმულ და სხვა ხარჯებს, ამასთანავე საჭიროებს მინიმუმ 10 მილიონის ინვესტიციას და მინიმუმ 6 თვიან სამონტაჟო პერიოდს.

კლინკერის წარმოების პროცესების სრული შესწავლიდან გამომდინარე გამოიკვთა სექცია, სადაც ტემპერატურა 600°C-დან 1200°C-მდე მერყეობს და მის შესამცირებლად გარემო ჰაერებს ვიყენებთ. აღნიშნული სექცია არის კლინკერის მაცივარი, სადაც ღუმელიდან გადმოსული 1200-1300°C-ზე გახურებული კლინკერი ხვდება. კლინკერი გაივლის 30 მეტრიან მაცივარს და დაახლოებით 100°C-მდე გაცივდება. ჩვენთვის სასურველი ტემპერატურები ცხელი მხრიდან 5-დან 10 მეტრამდე მონაკვეთში იყო.

ცხელი ბოლოდან 10 მეტრის მოშორებით მოხდა მასალის ჩამყრელი ყელის მოწყობა სადაც ტუფის მიწოდება 2 ბრუნ-რეგულირებადი ლენტით და ხვიმირით ხდება. 5% დოზით საწარმოო ექსპერიმენტი წარმატებულად დამთავრდა, მაგრამ ასევე შესაძლებელია პროპორციების გაზრდა 10%-მდე, შემდეგი ცდების პირობებში. ასევე ჩაყრის წერტილის გადატანა შეიძლება უფრო ცხელი მხარისკენ რაც კიდეც უფრო მეტად გააქტიურებს ტუფს და მოგვცემს საშუალებას გავზარდოთ მისი პროცენტულობა კლინკერში.

ყველაზე მნიშვნელოვანია ის, რომ აღნიშნულმა ექსპერიმენტმა საშუალება მოგვცა ვაწარმოოთ 100% კლინკერი 90% ემისიებით და თერმული ხარჯით, რაც

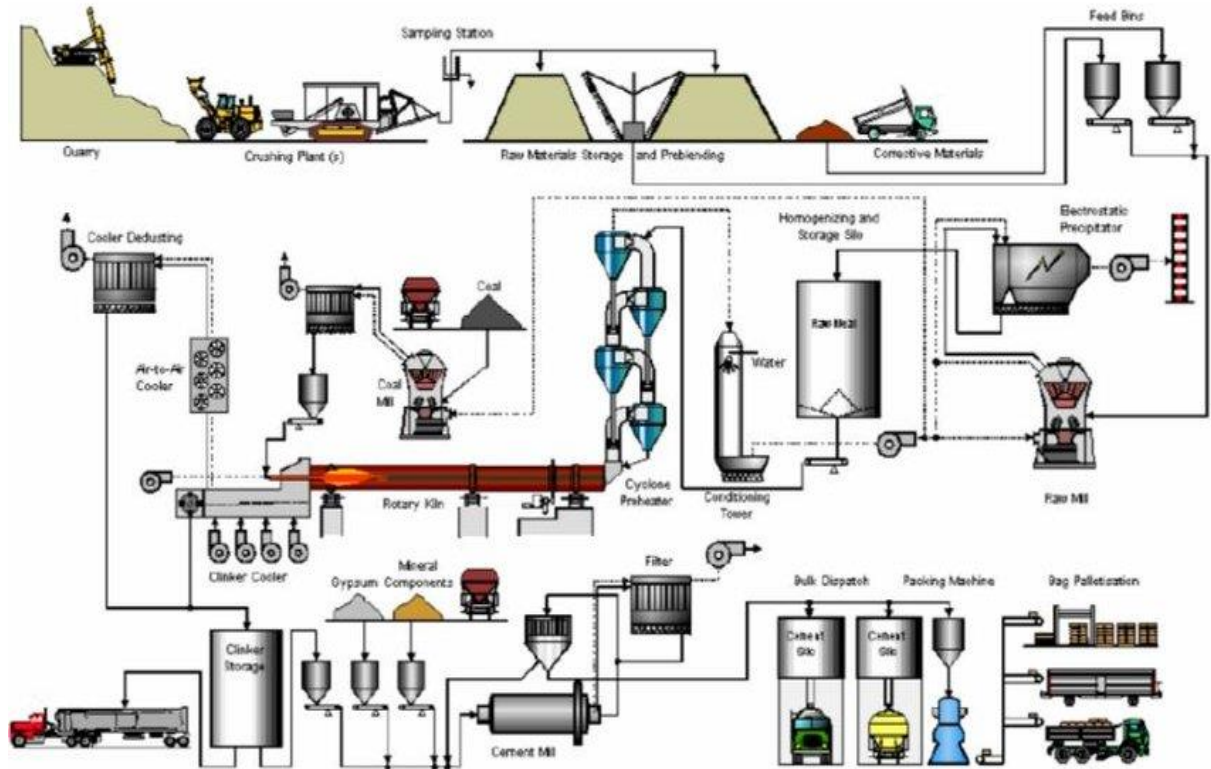
გლობალურად წარმოდგენილი შედეგია. პროექტის განხორციელება ხდება მინიმალური დანახარჯებით (200 ათასი ლარი) და რაც მთავარია არ მოითხოვს საწვავით მიღებულ თერმულ ენერგიას, რაც საოპერაციო ხარჯებს და ემისიებს თითქმის ანულებს. მაცივრის აღნიშნული სექცია შეიძლება გამოყენებულ იქნას ნებისმიერი სხვა ცემენტის დანამატი მასალის შრობა-გახურებისთვის.

კვლევის ობიექტი და მეთოდები: როგორც ზემოთ აღინიშნა ქარხნის მოდერნიზაციამ და ტექნიკურმა გადაიარაღებამ საშუალება მოგვცა არა მხოლოდ შეგვემცირებინა თბური დანახარჯი და გაგვეზარდა წარმადობა, არამედ გააფართოვა ნედლეული და საწვავი მასალების გამოყენების სპექტრი, რასაც ეფუძვნება ჩემი კვლევა. კვლევის მიზანია ახალი ტიპის ღუმელზე გამოვიყენოთ ისეთი საწვავი და ნედლეული და ავარჩიოთ მათგან საუკეთესო ნარევი, რომლებიც ყველაზე მეტ ეკონომიკურ ეფექტს იძლევა ცემენტის კლინკერის ხარისხის მინიმუმ შენარჩუნებით ან უკეთეს შემთხვევაში ხარისხის მაჩვენებლების გაზრდით.

კვლევის პირველი ნაწილი სტანდარტული მიდგომით ნედლეული და საწვავის პროპორციების გადათამაშებით საუკეთესო შედეგის მიღება იყო, ხოლო მეორე ნაწილში არასტანდარტული მიდგომით კლინკერის წარმადობის და დანახარჯის შემცირება იყო ჩაფიქრებული. პუცოლანური დანამატის - ტუფის თერმული აქტივაციით კლინკერის გარკვეული რაოდენობის (მიზანი 10%) ჩანაცვლება უნდა მომხდარიყო ისე, რომ საბოლოო ნარევის ხარისხი არ შემცირებულიყო. მიდგომა იმით იყო გამორჩეული და არასტანდარტული, რომ ტუფის აქტივაციისთვის თერმული ენერგია არ ხდებოდა საჭირო. სტანდარტულად მოხდებოდა საშრობი დოლის მონტაჟი სადაც მასალა - ტუფი გააქტიურდებოდა თერმულად და რასაც მოხმარდებოდა დიდი რამდენობით სითბური ენერგია, ჩვენი კვლევის შემთხვევაში კი მასალის გააქტიურება უკვე არსებულ გახურებულ კლინკერთან ურთიერქმედებით მივაღწიეთ.

კასპის ცემენტის ქარხნის ძირითადი ნედლეული მასალაა (85-90%), სასხორის კირქვა (მერგელი). აღნიშნული ნედლეული აფეთქების და შემდეგ ექსკავაციის საშუალებით მოიპოვე სასხორის კარიერზე, რომელიც კასპის ცემენტის ქარხნიდან დაშორებულია 17კმ-ით. მოპოვების შემდეგ ხდება მისი

გადაზიდვა ექსკავატორების და მაღალი მტვირთ ამწეობის მანქანებით პირდაპირ კასპის ქარხნის მსხვრევის უბანზე, სადაც დამონტაჟებულია (2016 წელს) “ჰაზემაგის” წარმოების ორმაგ-ჩაქუცებიანი სამსხვრეველა, წარმადობით 500ტ/სთ.



სურათი 1. ცემენტის ქარხნის, მშრალი მეთოდის ტექნოლოგიური სქემა

აღნიშნული სამსხვრეველას შეუძლია მიიღოს და გადაამუშავოს 0.8მ-მდე მოცულობის ქვა, მიღებული მასალის დაქუცმაცება ხდება 0-90მმ ფრაქციაზე. სამსხვრეველადან მასალა ლენტური კონვეიერით მიეწოდება 20000 ტონიან კირქვის საწყობს სადაც სტეკერის მეშვეობით ხდება მისი 2 შტაბელად ფორმირება რაც ხელს უწყობს მის ჰომოგენიზაციას (თითო შტაბელი 10000 ტონა მოცულობით).

სამსხვრეველასა და კირქვის საწყობს შორის ლენტურ კონვეიერზე დამონტაჟებულია სასწორი და ონლაინ ანალიზატორი (XBA), რომლებიც რადიაციული წყაროს საშუალებით განგრძობითად ზომავენ ლენტზე გავლილი მასალის წონას და მის ქიმიურ შემადგენლობას, რაც იძლევა იმის საშუალებას, რომ მუდმივ რეჟიმში კონტროლდებოდეს დასაწყობებული კირქვის რაოდენობა

და მისი ხარისხი (საშუალო და ყოველ წუთიერი ქიმიური შემადგენლობა და ხარისხობრივი მაჩვენებლების სტანდარტული გადახრის ფაქტორი).

მოწყობილობა: ორმაგ-ჩაქუჩებიანი სამსხვრეველა

მწარმოებელი: ჰაზმაგი

მისაწოდებელი მასალის მაქსიმალური ზომა: 0.8 მ³

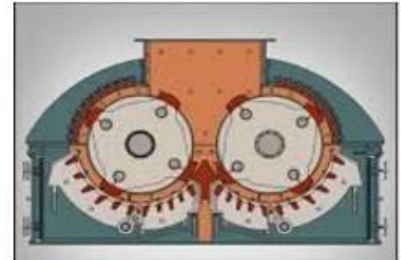
წარმადობა I: 350 ტ/სთ - 95% < 40მმ, 98% < 50მმ

წარმადობა II: 500 ტ/სთ - 95% < 90მმ, 98% < 100მმ

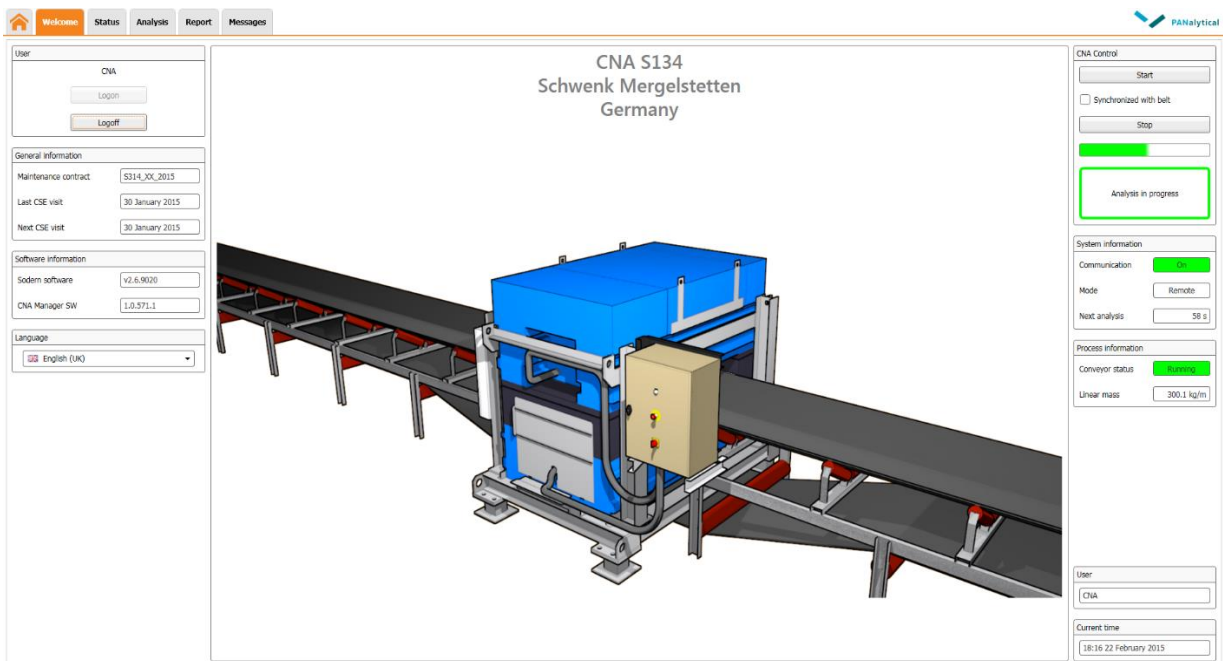
მიმწოდი ბუნკერის მოცულობა: 75 მ³

დაწნეხილი ჰაერის წყარო: კომპრესორი 4.57 მ³/სთ

დაწნეხილი ჰაერის სამუშაო წნევა: 4 – 6 ატმ (ბარი)



სურათი 2. ორმაგ-ჩაქუჩებიანი სამსხვრეველა



სურათი 3. კონვეიერზე დამონტაჟებული ონლაინ ანალიზატორი

სასხორის კირქვა კლინკერის გამოსაწვავი ფეკილის ძირითადი შემადგენელი მასალა, რომელიც დასაწყობების და ჰომოგენიზაციის შემდეგ რეკლამერის საშუალებით გადადის 4 ნედლეულის სილოსიდან ერთერთში საიდანაც დოზატორის და ლენტური კონვეიერის საშუალებით, მეორე ონლაინ

ანალიზატორის დავალებით მიეწოდება ვერტიკალურ როლიკებიან წისქვილს წარმადობით 270 ტ/სთ. დანარჩენ 3 სილოსში ნაწილდება შემდეგი ნედლეული:

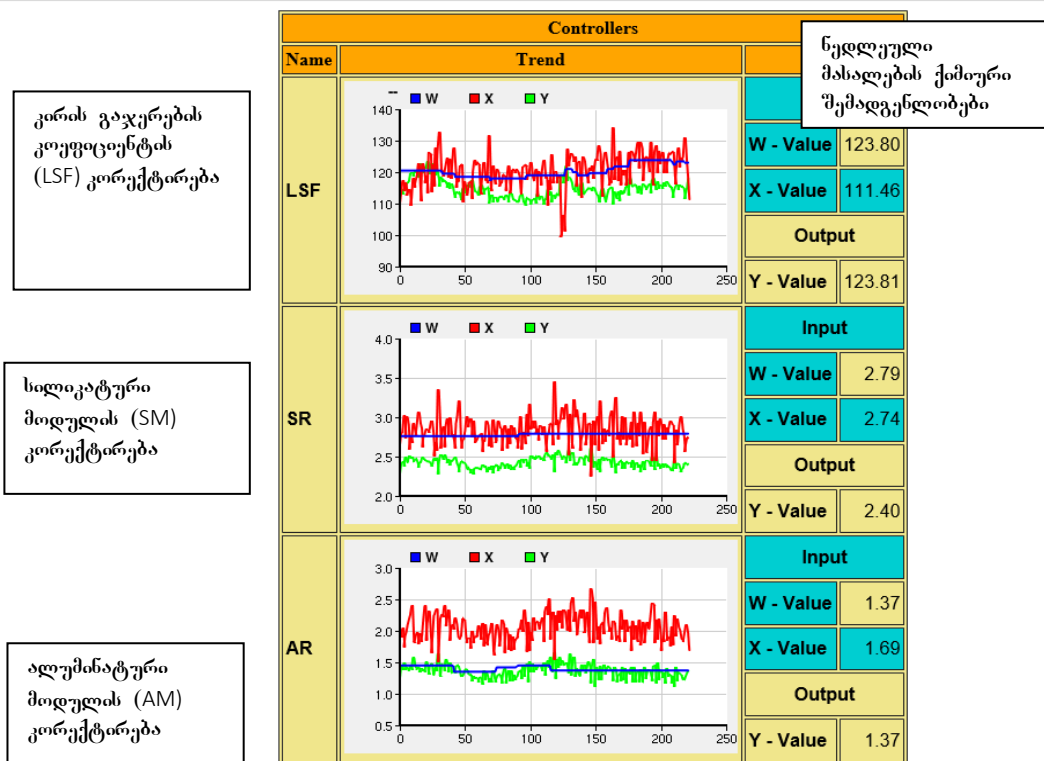
- მაღალი ხარისხის კირქვა (დედოფლისწყაროს კარიერიდან)
- ალუმინის წყარო
 - ალოქსიდი (ქართული საწარმოო ნარჩენი რუსთავიდან)
 - ბოქსიტი (საწარმოო ნარჩენი თურქეთიდან)
- რკინის წყარო
 - რკინის ნამწვი (საწარმოო ნარჩენი ესპანეთიდან)
 - კეკი (საწარმოო ნარჩენი აზერბაიჯანიდან)

მეორე ონლაინ ანალიზატორი, მიღებული დავალების (გაჯერების, სილიკატური და თიხა-მიწური კოეფიციენტები) მიხედვით და ჩამოთვლილი ნედლეულის ქიმიის მიხედვით დოზატორებს აძლევს დავალებას იმუშავოს კონკრეტულ წარმადობაზე, რათა მუდმივ რეჟიმში კონტროლდებოდეს წისქვილზე მისაწოდებელი მასალის შემადგენლობა და გადაცდენის შეთხვევაში კორექტირდებოდეს მასალების პროპორციების შეცვლით.

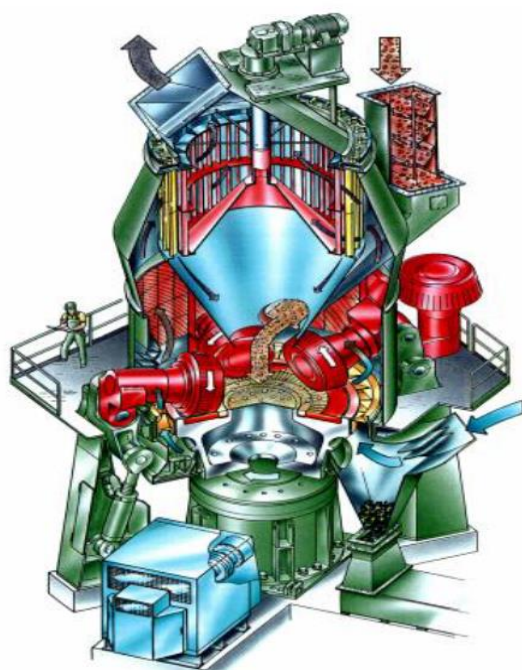
აღნიშნული პროცესი სრულად ავტომატიზირებულია და დაკალიბრებას ითხოვს მხოლოდ ინსტალაციისას ან რადიაციის წყაროს შეცვლისას, მაგრამ მუდმივად ხდება მისი სიზუსტის გადამოწმება ხელით არეზულის სინჯების XRF ანალიზატორის მეშვეობით.

მუდმივ რეჟიმში გაზომვების შედეგად უკვე დოზირებული კვება მიეწოდება ვერტიკალურ როლიკებიან წისქვილს სადაც ხდება მიწოდებული ნედლეულის დაფქვა-შრობა და შემდეგ ეტაპზე, ჰომოსილოსისკენ ტრანსპორტირება. აღნიშნული წისქვილი დამონტაჟებული და გაშვებულია 2018 წელს, მწარმოებელი გებრ. ფაიფერი (გერმანია).

Scale Nb.	Material	Oxide [%]									Price	LSF	SR	AR	Scale		Ratio			
		SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	K2O	Na2O	SO3	F					Min [T/h]	Max [T/h]	Min [%]	Max [%]	Real [%]	Setpoint [%]
1	HG Limestone	3.35	1.06	0.48	52.88	0.41	0.03	0.01	0.21	0.00	26.00	483.24	2.18	2.21	10.0	100.0	0.0	50.0	12.50	12.50
2	LG Limestone	13.27	3.16	0.80	45.00	0.11	1.33	0.22	0.03	0.00	8.00	108.68	3.35	3.95	35.0	350.0	0.0	100.0	84.36	84.36
3	Iron Ore	26.67	4.81	60.84	4.42	0.80	0.51	0.15	0.91	0.00	143.00	3.69	0.41	0.08	2.5	25.0	0.0	4.5	2.50	2.50
4	Aloxite	23.31	30.90	20.71	4.08	1.24	0.35	0.04	0.70	0.00	114.00	3.54	0.45	1.49	0.0	10.0	0.0	0.1	0.64	0.64



სურათი 4. მიმდინარე კორექტირების პროცესი ონლაინ ანალიზატორი პროგრამაში



სურათი 5. ნედლეულის ჰიდრავლიკური როლიკებიანი წისქვილის ესკიზი

მისაწოდებელი მასალის მაქსიმალური ფრაქცია უნდა იყოს არა უმეტეს 100მმ, მისი ზომები და ფრაქციული გადანაწილება დიდ გავლენას ახდენს წისქვილის წარმადობაზე. გამომავალი მასალა, რომელიც სეპარატორის წყალობით მაქსიმალურად ერთ ფრაქციას უშვებს წისქვილიდან, არის წმინდად დაფქვილი ისე, რომ ნარცენი 90η-იან საცერზე შეადგენს არაუმეტეს 12% და არა უმცირეს 10%-ს. აღნიშნული სიწმინდე კრიტიკულია წინაგამახურებლის ბოლო ციკლონების ეფექტურობისთვის, თუ ძალიან წმინდად იქნება დაფქვილი ღუმელში შემავალი ფქვილი მეტი იქნება დანაკარგი ციკლონიდან და შესაბამისად ციკლონის ეფექტურობა დაეცემა, სწორედ ამის გამო მკაცრად კონტროლდება დაფქვილი ნედლეული ფქვილის სიწმინდე. მეორეს მხრივ, თუ ზედმეტად მსხვილ ფრაქციაზეა ნედლეული ფქვილი დაფქვილი ღუმელში კალცინატორსა და წინაგამახურებელში იგი იქნება ნაკლებად თბოცვლადია და მეტ ენერგიას მოითხოვს (საწვავს) ამასთანავე კრისტალების დიდი ზომის გამო გამომწვარი კლინკერი იქნება ნაკლებად აქტიური და ძნელად დასაფქვავი.

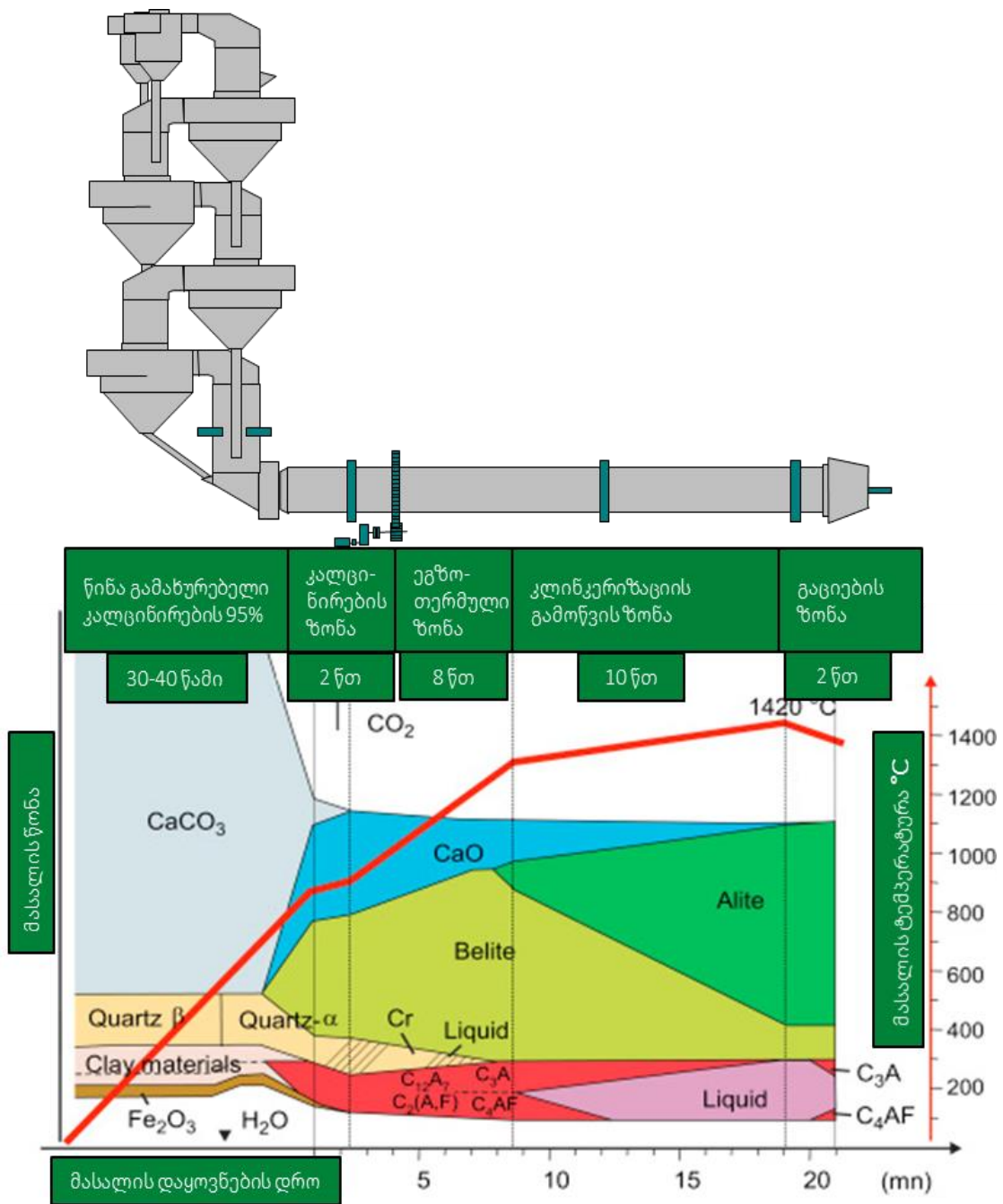
90η-იან საცერზე 10-12%-ის სიწმინდის ფქვილი, რომელიც ნედლეულის წისქვილში დაიფქვა, შემდგომი ჰომოგენიზაციისთვის თავსდება ჰომო-სილოსში, მოცულობით 7700მ³.

ნედლეულის ფქვილის ჰომოსილოსი წარმოადგენს მნიშვნელოვან კვანძს კლინკერის წარმოებაში სადაც ხდება მასალის კიდევ უფრო გაერთვაროვნება რაც თავის მხრივ ხელს უწყობს წინაგამახურებელში და ღუმელში მიდინარე თბურ პროცესებს. მისი პირდაპირი დანიშნულებაა დაწიოს მიღებული ნედლი ფქვილის სტანდარტული გადახრის ფაქტორი და სილოსიდან გამომავალი მასალა იყოს იმასზე უფრო ერთგვაროვანი ვიდრე იყო სილოსში ჩამავალი მასალა.

სილოსიდან გამოსული მასალა ციცხვებიანი ელევატორის საშუალებით ხვდება 5 ეტაპიან წინაგამახურებლის ყველაზე მაღალ საფეხურზე და გრავიტაციის ძალით ეშვება პირველი ციკლონიდან ქვევით, გაივლის 4 ციკლონს, ხოლო მე-4 ციკლონიდან გახურებულია ფქვილი ნაცვლად მე-5 ციკლონისა მიეწოდება დეკარბონიზატორს და მხოლოდ ამის შემდეგ გაივლის მე-5 ციკლონს საიდანაც გახურებული მასა მიეწოდება ღუმელს.

დაფქვილი ნედლეული ნარევი თავდაპირველად ხვდება ზედა მეორე და პირველ ციკლონს შორის გარდამავალი აირის არხში. გახურებული ნედლეული ნარევი წინაგამახურებელსა და ღუმელში გაივლის კლინკერიზაციის პროცესის ყველა ეტაპს, რომელსაც თანამედროვე ღუმელში ჯამში 30 წუთი დასჭირდება.

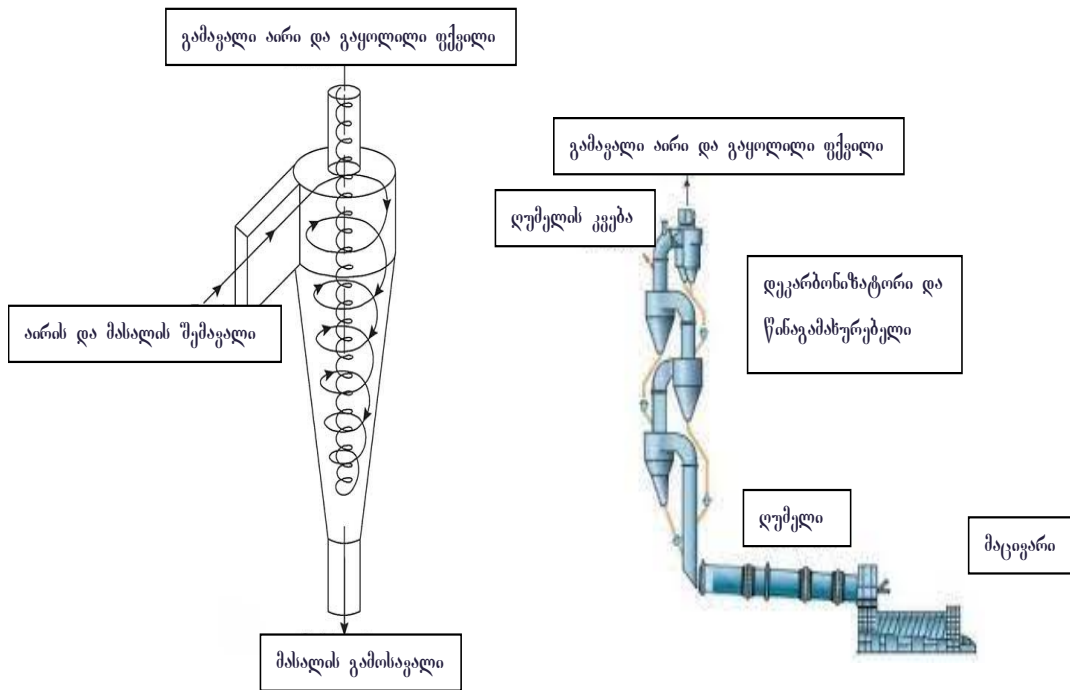
ქვედა სქემაზე მოცემულია ეტაპები და დაყოვნების ხანგრძლივობა, რომელსაც გადის ნედლეულის ფქვილი კლინკერად ჩამოყალიბების პროცესში.



სურათი 6. ნედლეულის ფქვილის კლინკერად ჩამოყალიბების პროცესი

კლინკერის წარმოებამდე ტექნოლოგიური სქემის ძირითადი კვანძებია: კირქვის კარიერი, სამსხვრევი, კირქვის ჰომოგენიზაციის საწყობი, ნედლეული მასალების პროპორცირების კვანძი (სილოსებით და დოზატორებით), ნედლეულის დაფქვის ვერტიკალური, როლიკებიანი წისქვილი, ნედლეული მასალის ტრანსპორტირების კვანძი და ნედლეული ფქვილის ჰომოგენიზაციის სილოსი.

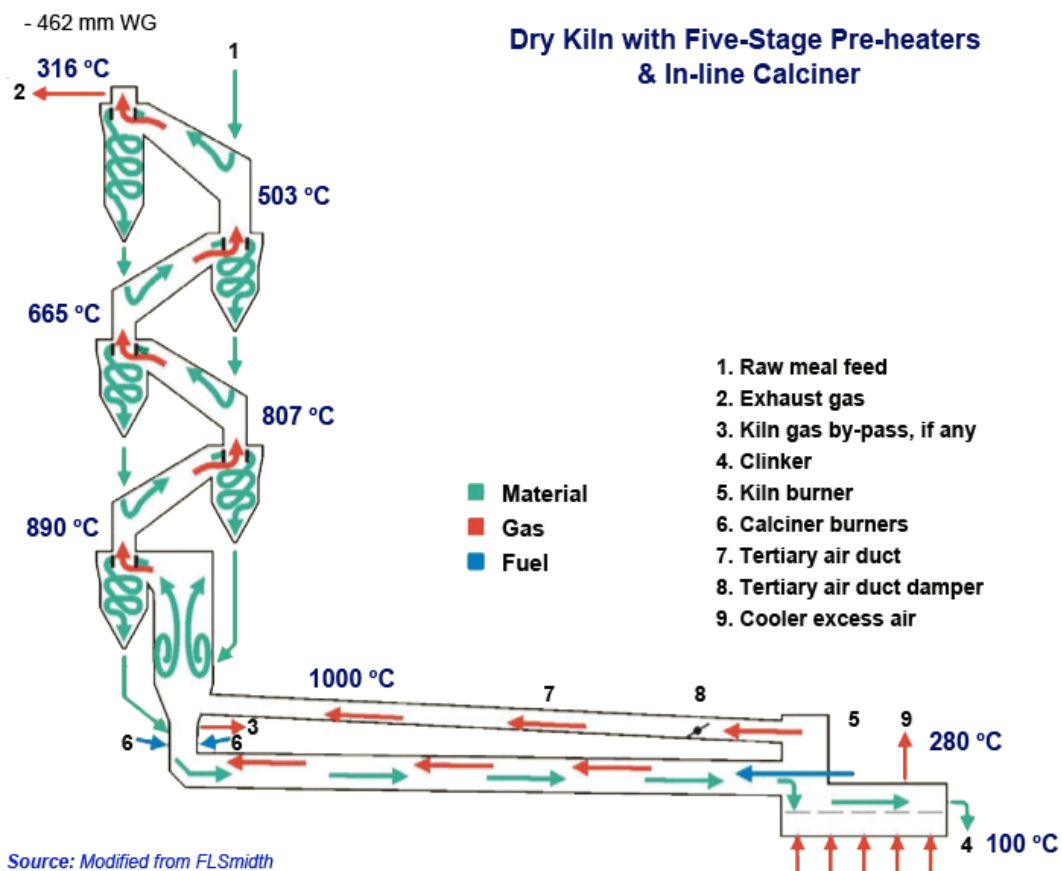
ამ ეტაპების გავლის შემდეგ, ნედლეულის ფქვილი ჰომოგენიზაციის სილოსიდან, სადაც მასალა მაქსიმალურად ერთგვაროვნდება, მასალის ელევატორის და აირსლაიდების წყალობით დოზირებულად მიეწოდება რეაქტორ-დეკარბონიზატორიანი ღუმელის ყველაზე მაღალ წერტილს (115 მეტრი), სადაც დაახლოებით 300°C გრადუსია.



სურათი 7. თბლომცვლელის ციკლონი და დეკარბონიზატორიანი ღუმელი

წინაგამასურებელის ტემპერატურული პროფილის წყალობით დისპერსიული მასალა დაახლოებით 95%-იან კალცინირებას განიცდის და ამას ახერხებს, მაქსიმუმ 2 წუთის განმავლობაში, როდესაც იგივე რეაქცია სველი მეთოდის ღუმელში 1 საათზე მეტ დაყოვნებას ითხოვდა. რაღა თქმა უნდა ეს არ მომხდარა იმის ხარჯზე, რომ დეკარბონიზაციის რეაქციამ განიცადა ცვლილება,

არამედ ეს დრო შეამცირა მასალის დისპერსიულობამ, რადგან განცალკევებულ ფეკილის ნამცეცებს, რომელთა დაფეკვის სიწმინდე 10-12%-ს შედგენს 90 მიკრონიან საცერზე, სითბო გაცილებით ადვილად გადაეცემა ვიდრე ერთ ნაკადად მიმავალ მასალას.



სურათი 8. დეკარბონიზატორიან ღუმელის წინაგამახურებლის ტემპერატურული პროფილი

ღუმელში (4.3 x 62მ, ჩინური წარმოების, 4.7 ბრ/წთ) შემავალი მასალა უკვე არის 95%-ით დეკარბონიზირებული, შესაბამისად როგორც ზემოთ აღინიშნა, ღუმელში რჩება დეკარბონიზაციის მცირე ზონა რასაც მოსდევს ეგზოთერმული რეაქციების ზონა, შემდეგ გამოწვა და ბოლოს გაციების ზონა. გაციების ზონიდან

კლინკერი ჩადის ცეცხლრიკა მაღალ-ეფექტურ მაცივარში (ასევე ჩინური წარმოების, ჩენდუს უნივერსიტეტის ინდუსტრიული ჯგუფის მიერ), სადაც ხდება სითბოს რეკუპერირება, ანუ სითბოს ართმევა და ცხელი ჰაერების უკან ლუმელში დაბრუნება, ხოლო მაცივრის მეორე ზონაში კლინკერის გაციება. ორივე პროცესი მაღალ წარმადობიანი ჰაერის ვენტილატორებით ხორციელდება. ამ პროცესების შემდეგ ვიღებთ მზა ნახევარპროდუქტს – კლინკერს.

ტრადიციულად კლინკერის მისაღებად სველ მეთოდში გამოიყენება კირქვა ან მერგელი ან მათი ნარევი, თიხა, ქვიშა და პირიტის ნამწვი. აღნიშნული ნედლეულისგან დამზადებული შლამი (30-40% სინესტი) მიეწოდება ლუმელს რომლის გაშრობისთვის, კალცინირებისთვის და გამოწვისთვის გამოიყენება ბუნებრივი გაზი, რომელსაც ნარჩენი პროდუქტი ისეთი და იმდენი არ აქვს, რომ კლინკერში ჩაჯდეს და მასზე აღსაღწიანი გავლენა მოახდინოს. რა თქმა უნდა, ასეთი პირობებით მუშაობა ამარტივებს პროცესს და დიდი ძალისხმევის გარეშე მიიღწევა ხარისხიანი კლინკერი გამოშვება, მაგრამ ქვეყნებში სადაც არ არის ადგილობრივი გაზის რესურსი ეს მეთოდი დიდ საწარმოო დანახარჯებს უკავშირდება და ასევე აქვს მცირე წარმადობა, რაც კლინკერის დანახარჯს მის ღირებულებაზე მეტს ხდის და შესაბამისად შეუძლებელია თანამედროვე ეკონომიკის პირობებში ამ მეთოდით, მასალებით და საწვავით ოპერირება.

ამ მიზეზების გამო ცემენტის ქარხნების უმრავლესობამ დაიწყო საწვავად შედარებით იაფი ნახშირის გამოყენება, რამაც თავის მხრივ შეცვალა კლინკერის მომზადებისათვის საჭირო ნედლეული, რადგან ნახშირის დაწვის შედეგად წარმოიქმნება ნარჩენი, ნაცარი, რომელიც დიდი რაოდენობითაა და ჯდება მომზადებულ ნედლეულში და არის კლინკერის შემადგენელი ნაწილი, რაც თავისთავად ითხოვს ცვლილებებს ნედლეული მასალების პროპორციებში, რადგან ითხოვს დასამზადებელი შლამის მოდულების ცვლილებას იმისათვის, რომ მიიღოს იგივე მახასიათებლების კლინკერი რაც ბუნებრივი გაზის დაწვის შემთხვევაში ხდებოდა.

ვინაიდან, ნახშირის ნაცრის შემადგენლობა ძალზედ წააგავს თიხის შემადგენლობას (ცხრილი 1), ორივეს ძირითადი მდგენელებია Al_2O_3 და SiO_2 , თიხა

ამოვარდა ხმარებიდან და მისი ადგილი დაიკავა ნახშირმა, რომლის ნამწვი პროდუქტიც ჯდება კლინკერის მოსამზადებელ ნედლეული შლამის კაზმში და ვიღებთ იგივე მახასიათებლების კლინკერს უკვე სხვა ნედლეულის პროპორციებით.

ცხრილი 1. ქართული ნახშირის და თიხის ქიმიური შემადგენლობები

ქიმიური შემადგენლობა	LOI [%]	SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	CaO [%]	MgO [%]	MnO [%]	Na ₂ O [%]	K ₂ O [%]	S-Bomb [%]	SO ₃ [%]	Cl [%]
ქართული ნახშირი	0.62	50.92	36.07	8.20	2.05	0.18	0.05	0.08	0.22	1.42	0.88	0.01
თიხა	0.80	64.79	17.17	7.22	0.4	2.38	0.09	0.15	2.68	-	0.79	0.04

2018 წელს ახალი მშრალი დეკარბონიზატორიანი ღუმელის გაშვების შემდეგ ნედლეული მასალები კიდევ ერთხელ შეიცვალა. აღნიშნულის მიზეზი რამოდენიმე იყო:

1. შეიცვალა მთავარი ნედლეულის კირქვის მოპოვების კარიერი და შესაბამისად კირქვის ხარისხი იყო განსხვავებული.
2. შეიცვალა საწვავი, ქართული ნახშირის მაგივრად დაიწყო საერთაშორისო ნახშირის გამოყენება
3. შეიცვალა კლინკერის გამოშვების მეთოდი, და შესაბამისად საწვავმოხმარებაც აღნიშნული ნაშრომი მიექვანება ხსენებული ცვლილებების გამოკვლევას, მანიპულაციას და ოპტიმიზაციას, იმისათვის რომ მივიღოთ ეკონომიკურად და ხარისხობრივად ყველაზე საუკეთესო მიქსების სინთეზი.

1. კარიერის კირქვის ცვლილება

კავთისხევის კარიერის კირქვა იდეალური ნარევი იყო კლინკერის წარმოებისთვის და მას დამატებითი კირქვით გამდიდრება აღარ ჭირდებოდა, მოითხოვდა მხოლოდ მოდულების დასარეგულირებელ მცირე რაოდენობის დანამატს (რკინის ნამწვი, თიხა, ქვიშა).

ცხრილი 2. კავთისხევის კირქვის ქიმიური შემადგენლობა

მასალა/ქიმიური შემადგენლობა	LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
კავთისხევის კირქვა ნიმუში №1	38.56	9.79	2.5	1.2	43.26	3.70	0.02	0.20	0.51	0.05
კავთისხევის კირქვა ნიმუში №2	42.6	2.42	0.82	0.3	51.20	2.26	0.00	0.06	0.14	0.08
კავთისხევის კირქვა ნიმუში №3	42.03	4.29	1.21	0.7	45.36	4.95	0.00	0.06	0.25	0.20
კავთისხევის კირქვა ნიმუში №4	41.35	4.27	1.21	0.8	50.67	1.19	0.00	0.02	0.22	0.03
კავთისხევის კირქვა ნიმუში №5	41.59	4.21	1.11	0.6	49.36	2.25	0.00	0.08	0.23	0.36
კავთისხევის კირქვა ნიმუში №6	31.39	22.22	5.47	2.0	35.48	1.15	0.09	0.04	1.09	0.10

ცხრილი 3. სასხორის კირქვის ქიმიური შემადგენლობა 2019 წლის პირველი ნახევარი

მასალა/ქიმიური შემადგენლობა	LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃
სასხორის კირქვა 1	34.46	16.76	3.44	1.23	40.23	1.24	0.04	0	0.84	0.06
სასხორის კირქვა 2	33.14	18.86	3.97	1.34	39.03	0.93	0.05	0	0.87	0.02
სასხორის კირქვა 3	31.11	25.33	5.38	1.46	33.65	1.41	0.02	0	0.69	0.11
სასხორის კირქვა 4	33.27	20.66	3.87	1.54	38.2	0.93	0.04	0	0.89	0.08
სასხორის კირქვა 5	36.53	13.26	2.49	0.91	43.61	0.71	0.04	0	0.59	0.04
სასხორის კირქვა 6	35.92	15.92	3.31	1.6	41.28	0.85	0.04	0	0.71	0.12
სასხორის კირქვა 7	31.88	19.89	4.66	1.41	39.88	1.09	0.04	0	0.9	0.13
სასხორის კირქვა 8	32.18	20.25	4.62	1.71	38.28	1.05	0.04	0	0.85	0.07
სასხორის კირქვა 9	36.7	13.22	2.38	0.89	43.91	0.88	0.04	0.02	0.9	0.06
სასხორის კირქვა 10	32.57	17.5	3.89	1.44	42.44	0.94	0.03	0.32	1.15	0.08

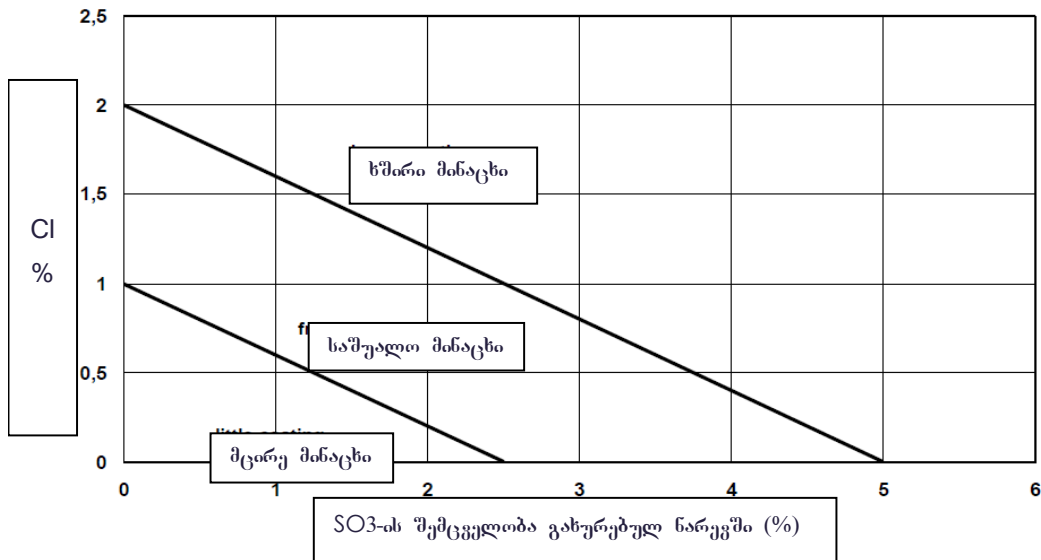
ცხრილი 3. სასხორის კირქვის ქიმიური შემადგენლობა 2019 წლის პირველი ნახევარი (გაგრძელება)

სასხორის კირქვა 11	36.37	12.7	2.56	0.92	45.45	0.71	0.03	0	0.66	0.07
სასხორის კირქვა 12	38.17	9.69	1.88	1.03	47.56	0.65	0.05	0	0.93	0.02
სასხორის კირქვა 13	31.55	21.26	4.85	1.88	35.85	1.51	0.04	0	1.03	0.09
სასხორის კირქვა 14	42.63	2.6	0.5	0.37	52.5	0.36	0.02	0	0.13	0.02
სასხორის კირქვა 15	31.61	20.52	4.59	1.78	37.71	1.48	0.04	0	0.99	0.1
სასხორის კირქვა 16	32.84	18.75	4.99	1.52	38.71	1.22	0.03	0.03	0.93	0.08
სასხორის კირქვა 17	36.12	12.75	3.67	1.65	42.17	2.52	0.03	0.26	0.73	0.09
სასხორის კირქვა 18	35.85	14.6	4.1	1.97	40.28	2.32	0.04	0	0.73	0.1

2. საწვავის ცვლილება, ნახშირი

სველ ღუმელებზე როგორც აღინიშნა კლინკერის გამოსაწვავად გამოიყენებოდა ქართული ნახშირი. ბაზარზე არსებულ საწვავებს შორის ქართული ნახშირის ყველაზე ხელსაყრელია ეკონომიკურად, თუმცა ასევე რთულია მისი წარმოების პროცესში გამოყენება რადგან შეიცავს გოგირდმჟავის მოჭარბებულ რაოდენობას.

გოგირდის (S) და გოგირდის ზეჟანგის (SO₂) მოჭარბებული რაოდენობა ართულებს ღუმელის ოპერირებას იმ კუთხით, რომ ჩნდება უკონტროლო ან ძნელად სამართავი მინაცხები ღუმელის სხვადასხვა მონაკვეთში, დამოკიდებულია ტემპერატურულ კონდიციებზე, რაც თავის მხრივ ზღუდავს მასალის გადაადგილებას და წევს მასალის დონეს იმ კონკრეტულ სექციაში, იწვევს ცხელი ჰაერის გადაადგილების გამწვანებას და შესაბამისად მთავარი კვამლგამწოვის დიდ დატვირთვას და წარმადობის შემცირებას, თავის მხრივ აღნიშნული მინაცხი არის არასტაბილური და მისი ერთბაშად ჩამოვარდნა იწვევს ცეცხლგამძლე ამონაგის დაზიანებას და გამოუწველი კლინკერის გამოშვებას. აღნიშნულის თავიდან ასაცილებლად ან შესამსუბუქებლად პროცესის მართვა და კონტროლი მეტად ინტენსიური და ამასთავაზე უმნიშვნელოვანესია სწორი ტექნოლოგიური დაგეგმვა.



სურათი 9. SO₃-ის და ქლორის შემცველობის გავლენა მასალის მიცხოებაზე

საკმაოდ ბევრი პრობლემის ხსენების მიუხედავად სველ ღუმელზე SO₃-ის შემცველობა უფრო ნაკლებ კრიტიკულია ვიდრე წინაგამახურებლიან და კალცინატორიან ღუმელებზე. ამ მეთოდების შემთხვევაშიც იგივე პროცესები ვითარდება სისტემაში, იმ განსხვავებით, რომ აქ ტემპერატურული პროფილი გაცილებით მეტად უწყობს ხელს ამ არასასურველი პროცესების განვითარებას და პრობლემის წარმოშობის ალბათობა გაზრდილია. ალბათობის გაზრდასთან ერთად პირდაპირ პროპორციულად იზრდება არასასურველი შედეგის სიდიდეც, რადგან წინაგამახურებელში და კალცინატორში ვერტიკალირად ხდება მასალის ზემოდან ქვემოთ ვარდნა 800მმ-იანი დიამეტრიც ციკლონის გამალი მილიდან და გადაადგილება ღუმელისკენ, ადვილი წარმოსადგენია რა მოხდება თუ კი მასალას ქვემოთ ამ მილიდან გამოსასვლელი შევიწროვებული ან სულაც ამოქოლილი დახვდა, ციკლონიდან გამოსავალს ვეღარ იპოვის და დაიწყებს მის ამოვსებას. გაზრდილი წარმადობიდან გამომდინარე ციკლონის ამოვსებას დაახლოებით 30-40 წუთი დაჭირდება.

ამოვსებული და გამაგრებული მასალის მოცილება დაახლოებით 1-დან 2 კვირამდე მძიმე და რისკიანი გამხსნელობითი სამუშაო, უამავი დახარჯული ადამიანური თუ მატერიალური რესურსი სჭირდება, ამასთანავე ეს პერიოდი ვერ ხდება კლინკერის წარმოება რაც საწარმოო დანახარჯებს ზრდის ხოლო შემოსავალს ამცირებს.

ცხრილი 4. საერთ. ნახშირის ქიმიური შემადგენლობები და კალორიულობა

საერთაშორისო ნახშირი	ჯამური სინესტე	ნაცარი	აქროლადები	სრული თბური ენერგია კჯ/კბ				მშრალი მასალის თბური ენერგია კკალ/კბ				
				სრული თბური ენერგია კჯ/კბ	სრული თბური ენერგია კკალ/კბ	მშრალი მასალის თბური ენერგია კჯ/კბ	მშრალი მასალის თბური ენერგია კკალ/კბ					
სინჯი 1	8.59	10.27	33.73	28286	6757	25666	6132					
სინჯი 2	8.13	11.50	33.22	28139	6722	25670	6132					
სინჯი 3	9.69	11.29	34.90	28679	6851	25685	6136					
სინჯი 4	9.21	11.55	33.89	27937	6674	25158	6010					
სინჯი 5	8.87	9.35	33.14	28562	6823	25844	6174					
სინჯი 6	9.19	13.05	33.93	27776	6635	25017	5976					
სინჯი 7	8.54	9.85	32.14	26944	6437	24451	5841					
სინჯი 8	11.73	9.72	31.70	28329	6767	24743	5911					
სინჯი 9	9.69	12.90	33.55	27291	6520	24431	5836					
სინჯი 10	8.15	10.59	33.30	27575	6587	25146	6007					
სინჯი 11	8.53	9.61	34.70	27743	6628	25184	6016					
სინჯი 12	8.49	13.00	33.16	27381	6541	24870	5941					
საერთაშორისო ნახშირი	LOI [%]	SiO2 [%]	Al2O3 [%]	Fe2O3 [%]	CaO [%]	MgO [%]	MnO [%]	Na2O [%]	K2O [%]	S [%]	SO3 [%]	Cl
სინჯი 1	0.85	55.59	26.68	8.73	4.11	1.06	0.05	0.01	1.77	0.56	1.15	
სინჯი 2	1.91	53.29	23.015	8.49	7.46	1.075	0.1	0.145	1.48	0.80	2.615	0.145
სინჯი 3	1.195	52.805	23	11.2	5.1	1.275	0.075	0.005	1.71	0.7	2.25	0.05
სინჯი 4	0.78	52.795	27.165	5.54	6.58	0.91	0.03	0.095	1.57	0.3	1.22	0.017
სინჯი 5	2.79	44.81	36.09	9.6	3.7	0.88	0.06	0.1	1.45	0.51	0.21	0.020
სინჯი 6	1.26	65.13	22.37	5.27	2.16	0.88	0.05	0.01	1.89	0.43	0.25	0.230
სინჯი 7	1.51	59.6	23.74	8.17	2.95	1.07	0.05	0.44	1.54	0.74	0.63	0.020
სინჯი 8	2.25	64.21	21.81	5.24	2.1	0.88	0.05	0.01	1.89	0.47	0.25	0.020
სინჯი 9	1.19	58.52	24.61	8.98	3.59	0.73	0	0.65	1.48	0.5	0.21	0.020
სინჯი 10	2.07	57.9	23.86	9.21	2.97	1.07	0.05	0.48	1.55	0.56	0.69	0.020
სინჯი 11	0.73	50.06	20.33	8.3	15.47	0.89	0.09	0	1.26	0.45	2.42	0.020
სინჯი 12	1.04	58.25	23.53	9.75	2.94	0.75	0.06	0	1.56	0.42	0.86	0.020

ცხრილი 5. ქართული ნახშირის ქიმიური შემადგენლობები და კალორიულობა

ქართული ნახშირი	ჯამური სინესტე	ნაცარი	აქროლად.	სრული თბური ენერჯია კჯ/კვ	სრული თბური ენერჯია კკალ/კვ	მშრალი მასალის თბური ენერჯია კჯ/კვ	მშრალი მასალის თბური ენერჯია კკალ/კვ
სინჯი 1	15.86	31.33	31.61	21080	5036	17382	4152
სინჯი 2	16.47	30.29	32.30	21175	5059	17318	4137
სინჯი 3	16.22	27.97	33.04	21096	5040	17310	4135
სინჯი 4	15.93	28.68	32.60	21088	5038	17371	4150
სინჯი 5	14.56	29.04	33.07	20970	5010	17589	4202
სინჯი 6	14.56	27.60	32.48	20995	5016	17614	4208
სინჯი 7	14.32	24.89	32.45	20730	4952	17440	4166

ქართული ნახშირი	LOI [%]	SiO2 [%]	Al2O3 [%]	Fe2O3 [%]	CaO [%]	MgO [%]	MnO [%]	Na2O [%]	K2O [%]	S [%]	SO3 [%]	Cl [%]
სინჯი 1	1.08	49.61	31.58	8.01	3.88	1.00	0.16	0.11	0.44	1.26	3.61	
სინჯი 2	0.51	47.85	33.75	9.70	3.45	0.86	0.03	0.01	0.38		3.21	
სინჯი 3	0.44	50.90	33.63	8.38	2.87	0.51	0.04	0.01	0.46		2.17	
სინჯი 4	0.77	49.90	31.60	8.74	3.51	0.62	0.14	0.01	0.38		2.47	
სინჯი 5	0.78	50.28	33.72	7.92	3.30	0.66	0.08	0.01	0.44	1.28	2.44	0.06
სინჯი 6	0.86	49.44	33.68	10.39	2.18	0.00	0.00	0.01	0.36		2.60	
სინჯი 7	0.60	48.45	32.44	11.73	3.01	0.01	0.01	0.01	0.31		3.08	0.13

ზემოთ აღნიშნული არა ერთი მიზეზის მიუხედავად აუცილებელია ტექნოლოგიაში გამოიყენებოდეს ნაკლები ღირებულების (როგორც ლოჯისტიკური ასევე უშუალოდ მასალის ღირებულება) საწვავი და ნედლეული, რადგან ყველა ქარხანას ეკონომიკური სარგებლის მიღება ამოძრავებს და მათ გამოყენებას ამჯობინებს სწორი ტექნოლოგიური მოწყობილობების, მეთოდების, კვლევების, დაგეგმვის და განხორციელების გზით.

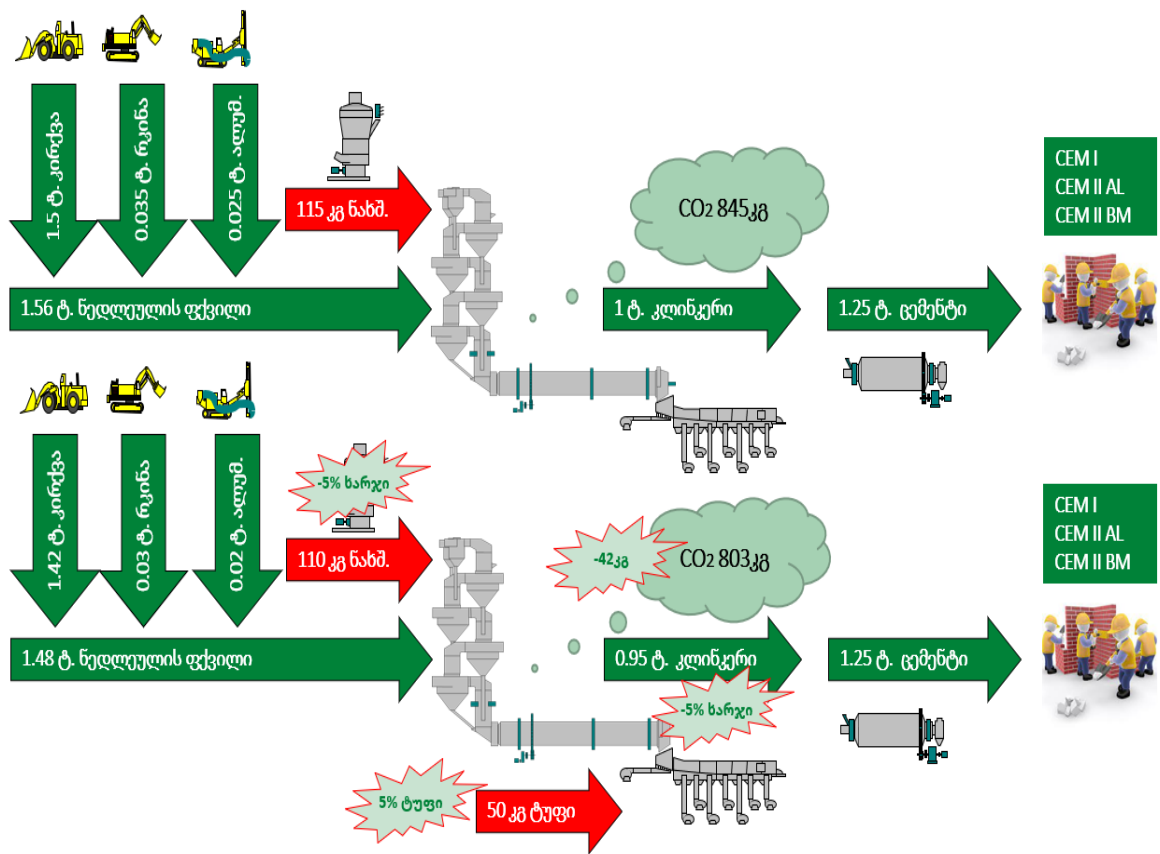
როგორც შესავალშივე აღნიშნა მეთოდის ცვლილებამ გამოიწვია საწვავის შემცირება, რაც მყარი საწვავის (ნახშირის) გამოყენების შემთხვევაში დიდ გავლენას ახდენს კლინკერის ქიმიურ ცვლილებაზე იმით, რომ სველ მეთოდში თუ ნახშირის მიწოდება ტონა კლინკერზე იყო 6.3გჯ ანუ დაახლოებით 250-260კგ 1ტ კლინკერზე მშრალი მეთოდით, რომლის ხარჯიც 3.1გჯ/ტონა კლინკერზეა მოიხმარს 120-125კგ 1 ტონა კლინკერზე. იდენტური ნახშირის ან ნახშირების მიქსების გამოყენებისას, რომლის ნაცარი იქნება 10%, სველი მეთოდის გამოშვებულ კლინკერზე ეს ნაცარი თავისი რაოდენობით 2-ჯერ მეტ გავლენას მოახდენს ვიდრე იგივეს შეძლებს მშრალ მეთოდზე რადგან 2-ჯერ ნაკლები რაოდენობის ნაცარი მიიღებს მონაწილეობას კლინკერიზაციაში.

მაგალითად, მასის ბალანსით 1 ტონა სველი მეთოდით გამომწვარი კლინკერი შედგება 975კგ ნედლეული ფქვილის გახურებული ნარევის და 25კგ ნაცრისაგან, ხოლო მშრალი ღუმელის შემთხვევაში 988კგ ნედლეული ფქვილის გახურებული ნარევის და მხოლოდ 12კგ ნაცრისაგან (იგივე ნახშირის გამოყენებით ნაცრიანობა 10%).

აქედან გამომდინარე მშრალი ღუმელის შემთხვევაში ფქვილის პროცენტული რაოდენობა კლინკერში იზრდება და შესაბამისად უფრო მეტ გავლენას ახდენს კლინკერის საბოლოო ხარისხზე, სწორედ ამიტომ აუცილებელი გახდა ახალი, პერსპექტიული კომპონენტების მოძიება და გამოცდა შემდგომი გამოყენებისთვის.

სამუშაოს პრაქტიკული მნიშვნელობა: სადისერტაციო ნაშრომში აღნიშნული კვლევები და მათი შედეგები არის მიღებული არა მხოლოდ ლაბორატორიული არამედ საწარმოო ექსპერიმენტებითაა დადასტურებული, რაც იძლევა იმის საშუალებას, რომ ნებისმიერ კლინკერის წარმოების ერთეულზე დაინერგოს აღნიშნული მიდგომები. ექსპერიმენტი მარტივი დასაწერია რაგან კონსტრუქციულად არ მოითხოვს კომპლექსურ ჩარევებს არსებულ ტექნოლოგიურ ხაზში. ტუფის მიწოდება კლინკერის ცეცხლრიკებიან მაცივარზე საკმაოდ დაბალ ბიუჯეტთან პროექტია (300.000 ლარი) და დიდი ეკონომიური მოგების მომტანი, რაც აადვილებს პროექტის განხორციელებას და თანხის უკუგება მაქსიმუმ 3 თვეშია შესაძლებელი.

ტუფის აქტივაციისას მიღებული შედეგი ვიზუალურად აღიქმება ქვემოთ მოცემულ სურათზე.



სურათი 10. კლინკერის მაცივარში ტუფის 5%-იანი დოზით მიწოდებული მასალის გავლენა ხარჯებსა და CO₂-ის ემისიაზე

პუბლიკაციები: სადისერტაციო ნაშრომი წარმოდგენილ იქნა საერთაშორისო კონფერენციაზე და ასევე სამი სტატია იქნა გამოქვეყნებული საერთაშორისო მეცნიერულ პუბლიკაციებში კვლევის შედეგების შესახებ.

აპრობაცია: სადისერტაციო ნაშრომის მასალები წარმოდგენილ იქნა საერთაშორისო კონფერენციაზე და ასევე მოხდა მასალების წარდგენა სტუ-ს ქიმიური ტექნოლოგიისა და მეტალურგიის ფაკულტეტის ქიმიური და ბიოლოგიური ინჟინერიების დეპარტამენტის სამ თემატურ კოლოკვიუმზე.

სამუშაოს მოცულობა და სტრუქტურა: დისერტაცია მოიცავს 125 გვერდს, 38 ცხრილს, 29 ნახაზს და 20 სურათს. დისერტაცია შედგება შესავლისაგან, ლიტერატურული მიმოხილვისაგან, ექსპერიმენტული კვლევის, კვლევის შედეგებისა და მათი განხილვისაგან, დასკვნისა და გამოყენებული ლიტერატურის ნუსხისაგან.

კვლევის ძირითადი შედეგები

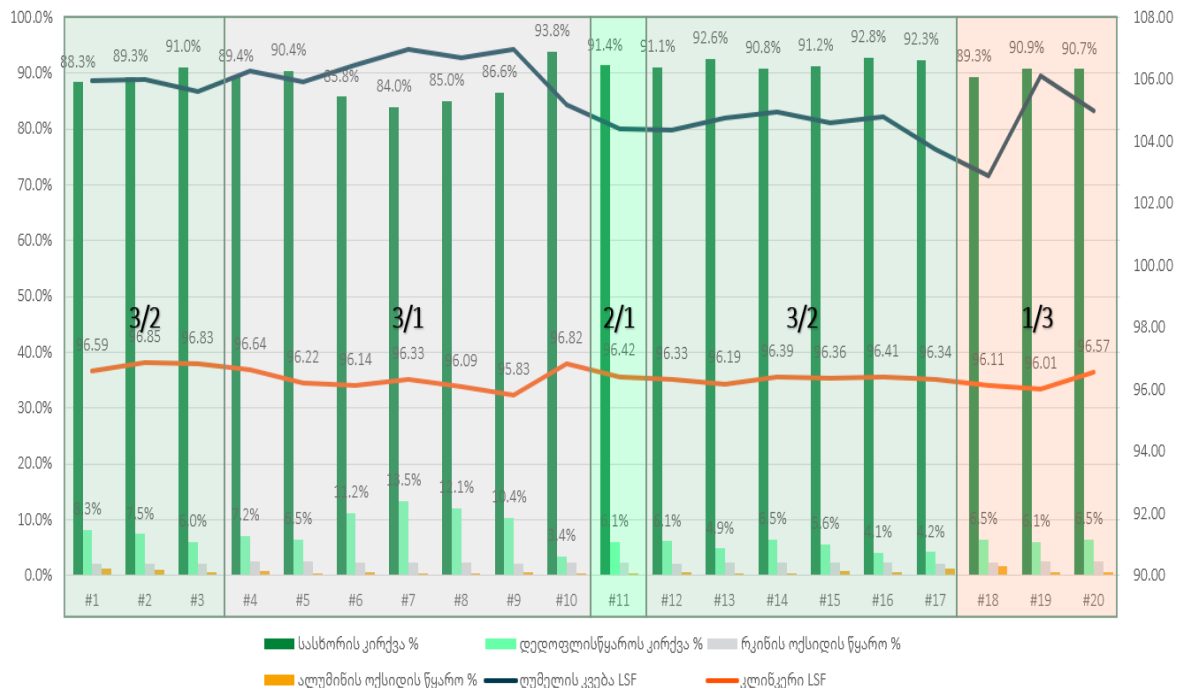
გამოწვის მეთოდის ცვლილება აუცილებელი იყო რათა კლინკერის წარმოება პასუხებდეს თანამედროვე მოთხოვნებს, შეამციროს თბური ხარჯი და იყოს კონკურენტული ბაზარზე.

გამოწვის მეთოდის და საწვავის ცვლილება დიდ გავლენას ახდენს მოსამზადებელი ნედლეული ფქვილის მიქსზე. რიგ შემთხვევაში აუცილებელი ხდება ნედლეული მასალის გამოცვლა ან დამატება.

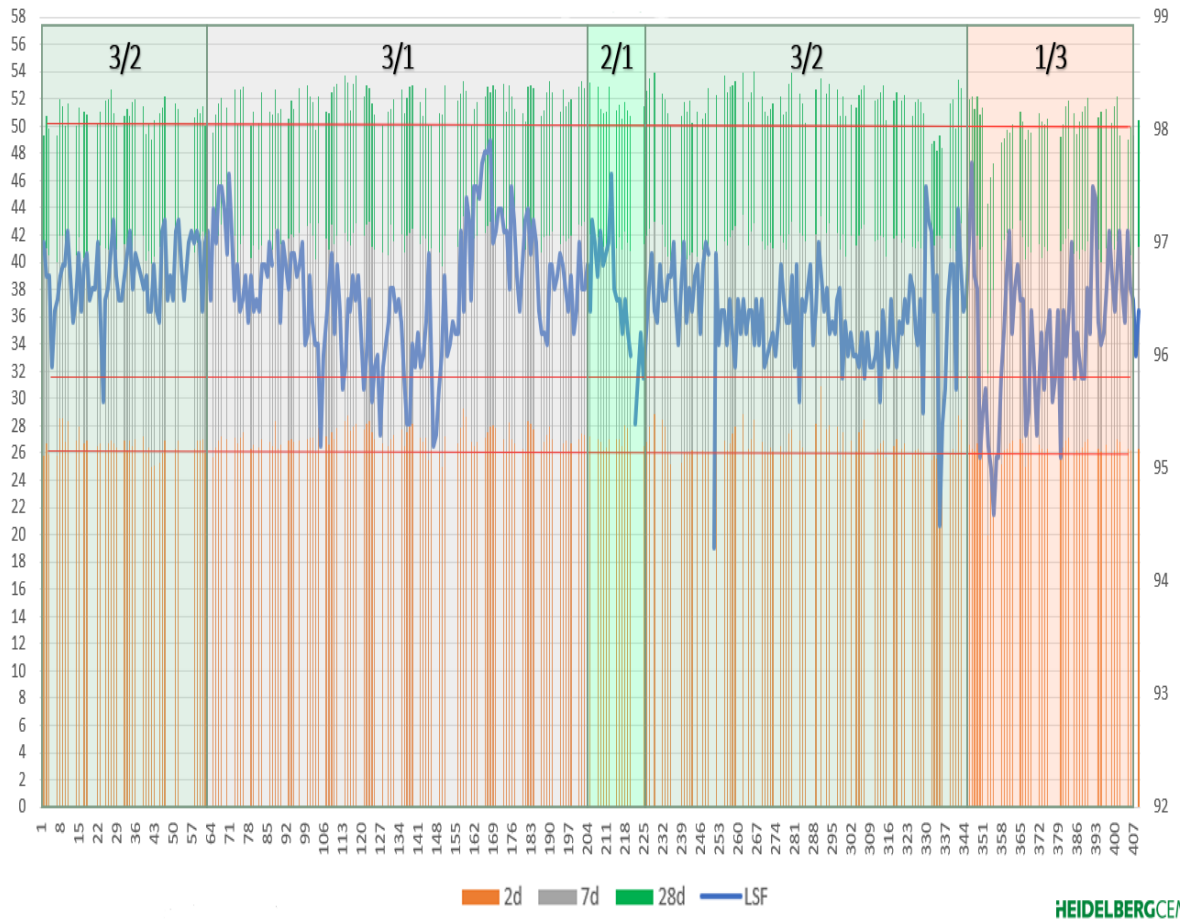
თანამედროვე გამოწვევების პირობებში აუცილებელია საწვავის და ნედლეულის ნარევის მუდმივი განახლება და თბური და მასალათა დანახარჯის ოპტიმიზაცია.

ბოქსიტის გამოყენებამ საშუალება მოგვცა დაბალი ხარისხის და ფასის ალუმინის კომპონენტი შეგვენარჩუნებინა მიქსში ისე, რომ დაფქვილი მასალის ხარისხი არის შენარჩუნებული სასურველი მახასიათებლებით.

აზერბაიჯანული კევი საშუალებას იძლევა ჩაანაცვლოს ძვირად ღირებული რკინის ნამწვი გარკვეული პროპორციით.



ნახაზი 1. ნედლეულის მასალების ხარჯები და მასალის ხარისხის შედარება



ნახაზი 2. ნედლეულის მასალების ხარჯების და ხარისხის შედარება

როგორც ზემოთ მოცემულ გრაფიკებზეა გამოსახული, ექსპერიმენტების გამვალობაში ნედლეული ნარევის გაჯერების კოეფიციენტი მერყეობდა 104-დან 107-მდე, თუმცა სასხორის კირქვის სხოლო კლინკერის კირის ჩაჯდომის კოეფიციენტი სტაბილურად 96-96.5 იყო. ამასთანავე განსხვავდებოდა ნედლეული მასალის ხარჯი და კლინკერის აქტიურობა ანუ სიმტკიცე. მაღალი კირის ჩაჯდომის კოეფიციენტის მქონე ნედლეული ნარევის გამოსაწვავად შესაბამისად უფრო დიდი თერმული ენერჯიაა საჭირო, მაგრამ ამასთანავე გაცილებით მეტი CO₂-ის ემისია გამოიყოფა არა მხოლოდ მომატებული თერმული ხარჯის გამო, არამედ მეტი კირქვის მინერალის (CaCO₃) გაზრდილი რაოდენობის და მისი დეკომპოზიციისას გამოყოფილი CO₂-ის გამო. შესაბამისად ყველაზე დიდი ეკონომიურ და ეკოლოგიურ ეფექტს იძლეოდა ექსპერიმენტი, რომელშიც ნედლეული ნარევის გაჯერების კოეფიციენტი იყო ყველაზე დაბალი მაგრამ კლინკერის აქტიურობა ანუ სიმტკიცე იყო შედარებით მაღალი.

პირველი ცდის შესადარებელი კლინკერის 2 დღიანი სიმტკიცე იყო 29.5 მპა, ხოლო მაცივარში გახურებული ტუფის 5 %-ის დამატების შემდეგ გაიზარდა და გახდა 31.3 მპა, რაც აღნიშნავს, რომ 5%-ის დოზით გახურებული ტუფის კლინკერში დამატება დადებით გავლენას ახდენს ადრეულ სიმტკიცეებზე. კლინკერის და გახურებული ტუფის უკვე 8%-ის შერევის შემდეგ მაინც შეინიშნა სიმტკიცის შედარებით ნაკლები, მაგრამ მაინც შესამჩნევი ზრდა, სიმტკიცის სიდიდემ ამჯერად 30.5 მპა-ს მიაღწია. კლინკერის და გახურებული ტუფის უკვე 10%-ის შერევის შემდეგ კლინკერის სიმტკიცე ოდნავ გაიზარდა და მხოლოდ 0.3 მპა-ით მეტი იყო, შეიძლება ითქვას დიდად არ შეცვლილა, რაც იმას ნიშნავს, რომ 10% გახურებული და გააქტიურებული ტუფის დამატების შემდეგ კლინკერი იგივე ადრეულ სიმტკიცეს ინარჩუნებს.

რაც შეეხება საბოლოო სიმტკიცეებს, ისენი შედარებით ნაკლები გამოდიოდა თუმცა საბოლოო სიმტკიცე სტანდარტში განსაზღვრულ მოთხოვნებს სრულად აკმაყოფილებს. როგორც ზემოთ აღინიშნა, ტუფი აქტიურდება იმის ხარჯზე, რომ ხდება ფიზიკური წყლის აორთქლება რაც თავის მხრივ ზრდის ფორიანობას და მასალა ხდება გაცილებით უფრო აქტიური ვიდრე ეს ნედლად ანუ მოპოვებისას იყო. თეორიულად გაჩნდა ეს მოსაზრება ცდების დასაწყისშივე, რაც თავის მხრივ გადამოწმდა ლაბორატორიული ექსპერიმენტით.

ლაბორატორიული ექსპერიმენტით დადგინდა, რომ ნედლი ტუფის საწყისი სინესტე იყო 15%, ხოლო 105°C-ზე შრობისას მისი სინესტე მხოლოდ 4%-ით შემცირდა რადგან ტუფში ძირითადად ფიზიკურ ბმაში მყოფი წყალია. ეს შედეგი იმას მიგვანიშნებდა, რომ ტუფის შრობა უნდა გაკეთებულიყო გაცილებით მაღალ ტემპერატურებზე. ცდებით დადგინდა, რომ 800°C-ზე შრობისას ხდებოდა მისი სრულყოფილი გააქტიურება, რაც გულისხმობს იმას, რომ არამხოლოდ ზეპირული არამედ ფიზიკურ ბმაში არსებული წყალი შრებოდა რაც დაახლოებით 11%-ს შეადგენდა. როდესაც წყალთან ბმაში არსებული ოქსიდები ტემპერატურის ხარჯზე თავისუფლდებოდა წყლის ოქსიდისგან, ეს იწვევდა არსებული ოქსიდების უფრო მეტ აქტიურობას არსებული ფორების გათვალისწინებით, რაც თავის მხრივ დადებითად აისახებოდა სიმტკიცეზე.

ცხრილი 6. ნედლ და გახურებულ ტუფში წყლის შემცველობა (ლაბ. ცდა)

მასა (გ)	ტემპერატურა	სინესტე
100	0°C	0
96.09	105°C	4%
85.1	800°C	15%

როგორც აღინიშნა, კლინკერის მაცივარში ჩაყრის წერტილზე დაახლოებით 650-750°C გრადუსია და დაყოვნების დროც გაცილებით ნაკლებია ვიდრე ლაბორატორიულ ღუმელში (1სთ ლაბორატორიულ ღუმელში, ხოლო კლინკერის მაცივარში დაახლოებით 10-15 წუთი), ამიტომ სრულად არ ხდება ტუფის გააქტიურება. სამომავლოდ შეიძლება გაცილებით უფრო უკეთესი აქტივაციის მიღება ჩაყრის წერტილის შედარებით ცხელ წერტილში გადაწევით.

ცხრილი 7. ნედლ და გახურებულ ტუფში წყლის შემცველობა (კლ. მაცივარში)

ტუფის სინესტე მაცივრის შემდეგ	ტუფის სინესტე 800°C-ზე
6.5%	8.5%

აღნიშნული მონაცემების ნიშნავს იმას, რომ ტუფის კიდევ უფრო მეტად გააქტიურება არის შესაძლებელი და შესაბამისად მისი კლინკერში წილის გაზრდისაც.

დასკვნა

დადგინდა რომ, სველი მეთოდიდან მშრალ მეთოდზე გადასვლა მოხდა ისე, რომ კლინკერის დაფქვადობა გაიზარდა, კლინკერის სიმტკიცე იგივე ან გაზრდილია შედარებით ნაკლები LSF-ის კოეფიციენტით, სითბური ხარჯი ტონა კლინკერზე შემცირდა 2-ჯერ და წარმადობა გაიზარდა 2-ჯერ (ერთად აღებულ 3 სველ ღუმელთან მიმართებაში).

კავთისხევის კარიერის გადართვით გამოწვეული სირთულეები მოგვარებულ იქნა, სასხორის კირქვასთან ერთად გამამდიდრებლად გამოყენებულ იქნა დედოფლის წყაროს კირქვა რომლის 95%-ზე მეტი კალციუმის კარბონატია. ეს ჩანაცვლება მოხდა ისე, რომ კლინკერის ხარისხზე უარყოფითი გავლენა არ ჰქონია, არამედ უფრო მეტად სტაბილური და აქტიური გახდა. ნახშირის და შესაბამისად ნაცრის 2-ჯერ შემცირების შემდეგ ნედლეული ფქვილის ქიმია გადაითვალა ისე რომ კლინკერის ხარისხი იყო იგივე ან გაზრდილი. შესაბამისი გადათვლა ხდებოდა ცდების ყველა ეტაპზე. კლინკერის ახალი მეთოდით გამოწვის პროცესი შესწავლილი და ოპტიმიზირებული იქნა. ნედლეულის და საწვავის გადანაწილების 20 ინდუსტრიული ექსპერიმენტის შედეგად დადგინდა საუკეთესო მიქსები, რომელთა საშუალებით კლინკერის ხარისხი იზრდება ან იგივე რჩება, ხოლო თბური დანახარჯი, საწვავის და ნედლეული ფქვილისგან მიღებული CO₂-ის ემისიები კი შემცირდა, რაც იძლევა როგორც ეკომონიურ ასევე ეკოლოგიურ ეფექტს.

ყველაზე მნიშვნელოვანი მიღწევა იყო ტუფის თერმული აქტივაცია, რომელიც წარმატებით დამთავრდა უკვე არა მხოლოდ ლაბორატორიული არამედ ინდუსტრიული ექსპერიმენტითაც. ინოვაციური იდეის საწყისი ის იყო რომ ფიზიკურად შეკავშირებული წყლის გამოდევნა (გამოშრობა) პუცოლანურ მასალას გაცილებით აქტიურს ხდის და მისი 10%-მდე მოხმარება კლინკერთან მიმართებაში არამხოლოდ ინარჩუნებს არამედ ზრდის კიდევ ამ ნარევის სიმტკიცეს კლინკერთან შედარებით.

არსებული პუცოლანური მასალის გააქტიურების მეთოდი შესწავლილი იყო ადრეული 70-იანი წლებიდან მოყოლებული. თუმცა პუცოლანური დანამატის

გააქტიურებას სჭირდება არანაკლები თბური ენერგია გასახერხებლად ვიდრე კლინკერს და შესაბამისად ისიც გამოყოფს დამატებით CO₂-ის ემისიებს. ამიტომ სტანდარტული მიდგომით გააქტიურებული პუცოლანური მასალა შედარებით ნაკლებად ამცირებს გამონაბოლქვს, თერმულ და სხვა ხარჯებს, ამასთანავე საჭიროებს მინიმუმ 10 მილიონის ინვესტიციას და მინიმუმ 6 თვიან სამონტაჟო პერიოდს.

კლინკერის წარმოების პროცესების სრული შესწავლიდან გამომდინარე განისაზღვრა სექცია, სადაც ტემპერატურა 600°C-დან 1200°C-მდე მერყეობს და მის შესამცირებლად გარემო ჰაერებს ვიყენებთ. აღნიშნული სექცია არის კლინკერის მაცივარი, სადაც ღუმელიდან გადმოსული 1200-1300°C-ზე გახურებული კლინკერი ხვდება. კლინკერი გაივლის 30 მეტრიან მაცივარს და დაახლოებით 100°C-მდე გაცივდება. ჩვენთვის სასურველი ტემპერატურები ცხელი მხრიდან 5-დან 10 მეტრამდე მონაკვეთში იყო.

ცხელი ბოლოდან 10 მეტრის მოშორებით მოხდა მასალის ჩამყრელი ყელის მოწყობა სადაც ტუფის მიწოდება 2 ბრუნ-რეგულირებადი ლენტით და ხვიმირით ხდება. 5% დოზით საწარმოო ექსპერიმენტი წარმატებულად დამთავრდა, მაგრამ ასევე შესაძლებელია პროპორციების გაზრდა 10%-მდე, შემდეგი ცდების პირობებში. ასევე ჩაყრის წერტილის გადატანა შეიძლება უფრო ცხელი მხარისკენ რაც კიდევ უფრო მეტად გააქტიურებს ტუფს და მოგვცემს საშუალებას გავზარდოთ მისი პროცენტულობა კლინკერში. აღნიშნულმა ექსპერიმენტით დადგინდა, რომ არსებობს საშუალება ვაწარმოოთ 100% კლინკერი 90% ემისიებით და თერმული ხარჯით, რაც გლობალური მნიშვნელობის შედეგია. პროექტის განხორციელება ხდება მინიმალური დანახარჯებით (200 ათასი ლარი) და რაც მთავარია არ მოითხოვს საწვავით მიღებულ თერმულ ენერგიას, რაც საოპერაციო ხარჯებს და ემისიებს თითქმის ანულებს.

დადგინდა, რომ მაცივრის აღნიშნული სექცია შეიძლება გამოყენებულ იქნას ნებისმიერი სხვა მასალის შრობა-გახურებისთვის და წარმოებაში გამოყენების მიზნით. ამ მიდგომის აღმოჩენა გატესტვამ შეიძლება საფუძველი დაუდოს ამ არსებული ინდუსტრიული არსებული

დისერტაციის ძირითადი შედეგები გამოქვეყნებულია შემდეგ შრომებში

1. Vakhtang Chkheidze. Crimsonpublishers: Local Raw Material, Fuel and Clinker Production Processing with 5 Stage Pre- Calciner Kiln and Grate Cooler in Georgia 2021. DOI: 10.31031/PPS.2020.03.000577
2. Vakhtang Chkheidze. Tamaz Gabadadze. Science Georgia International Conference on Global Practice of Multidisciplinary Scientific Studies Dedicated to the 100th Anniversary of "GEORGIAN TECHNICAL UNIVERSITY - GTU". LOCAL RAW MATERIAL, FUEL AND CLINKER PRODUCTION PROCESSING WITH 5 STAGE PRE-CALCINER KILN AND GRATE COOLER IN GEORGIA (page 960-964). 2022
3. Vakhtang Chkheidze. Conversion processes of local raw materials considering the use of reactor-decarbonizer in rotary kiln system for clinker production. Journals 4science. 2023

Abstract

In cement and clinker production energy consumption reduction, specific emissions reduction and quality stable increase always has been daily challenge which was addressed in many studies. Nowadays, CO₂ emissions are under special focus since the gas is a main contributor in global warming and many other environmental topics. Considering existing challenges, the PhD study is addressing following:

- Revamping from wet process to the new dry line clinker production process
- Revamping from the old Kavtiskhevi quarry to new Saskhori quarry
- Raw meal, kiln feed and clinker quality adjustment after changing the type and amount of the fuel
- Study of clinkerization process based on the modified design
- Activation of pozzolanic material – Tuff in the clinker cooler

Clinker production process change from wet process to dry process was performed the way that clinker quality was at least the same but grindability of the clinker was increased with relatively lower lime saturation factor. Of course, by avoiding drying wet slurry and making heat exchange process more efficient due to more dispersive, powderous material the heat consumption was reduced twice, and capacity of the kiln line was doubled. The difficulties caused by switching the Kavtishkevi quarry were solved by using Saskhori limestone as a main source and Dedopsitskaro limestone was used as a sweetener, which contains more than 95% calcium carbonate. This substitution took place in such a way that it did not have a negative impact on the quality of the clinker and on the contrary made it more stable and active.

After reducing coal and thus ash by 2 times, raw flour chemistry was recalculated so that the quality of clinker was the same or increased. Appropriate recalculation was done at all stages of trials. The clinker process burning with a new method was studied and optimized. As a result of 20 industrial experiments of raw material and fuel distribution, the best mixes were determined, by means of which the quality of clinker increases or remains the same, while the thermal consumption was reduced as was CO₂ emissions from fuel and from raw meal.

The most important achievement was the thermal activation of Tuff (Zeolite), which was successfully completed not only in the laboratory but also in the industrial experiment. The origin of the innovative idea was that the drying out of physically bound water makes the pozzolanic material much more active due to created pores. The material usage (with clinker) up to 10% in relation to clinker not only preserves but also increases the strength of this mix compared to clinker.

The method of activation of existing pozzolanic material has been studied since the ancient Roman period. However, the activation of the pozzolanic additive requires less thermal energy than the clinker, and therefore also emits additional CO₂ emissions. Therefore, the pozzolanic material activated by the standard approach reduces emissions,

thermal and other costs relatively less, and also requires an investment of at least 10 million and an installation period of at least 6 months.

Based on a complete study of the clinker production processes, a section was identified where the temperature ranges from 600°C to 1200°C and we use ambient air to reduce it. This section is a clinker cooler, where clinker heated at temperatures 1200-1300°C is coming out of from the rotary kiln. The clinker is passing a 30-meter cooler and cools down to about 100°C. The temperatures we wanted were 5 to 10 meters from the hot side.

10 meters away from the hot end, a material discharge chute was arranged, where tuff is supplied with transport conveyors and hopper. The production experiment with a dose of 5% was successful, but it is also possible to increase the proportions to 10% in the following trials. Also, the feeding point on the clinker cooler roof can be moved to the hotter side, which will further activate the tuff and allow us to increase its percentage in the clinker.

The most important is that this experiment allowed us to produce 100% clinker with 90% emissions and thermal consumption, which is an incredible result globally, especially for CO₂ reduction. The project was implemented with minimal costs (200,000 GEL) and, most importantly, does not include the thermal energy obtained with fuel, which almost cancels the operating costs and emissions. This section of the clinker cooler can be studied to use for drying and heating any other cement additive material.