

XÂY DỰNG MÔ HÌNH TOÁN HỌC TUYẾN TÍNH HỖ TRỢ LẬP KẾ HOẠCH SẢN XUẤT DÀI HẠN CHO CÁC MỎ ĐÁ VÔI XI MĂNG Ở VIỆT NAM

*TS. Trần Đình Bảo, TS. Nguyễn Đình An, Lê Đình Phiệt
Trường Đại học Mỏ - Địa chất*

Tóm tắt: Trong môi trường kinh doanh có tính cạnh tranh cao hiện nay, tiết kiệm chi phí nguyên liệu là một vấn đề lớn trong sản xuất xi măng. Một trong những giải pháp giúp giảm thiểu chi phí nguyên liệu đầu vào là trung hòa đá vôi tại mỏ. Trong bài báo này, mô hình lập trình tuyến tính mới được xây dựng để giải quyết vấn đề lập kế hoạch sản xuất dài hạn nhằm giảm thiểu chi phí nguyên liệu thô trong khai thác mỏ đá vôi cung cấp cho nhà máy xi măng. Rất nhiều các ràng buộc bao gồm các yêu cầu về phối trộn, trữ lượng mỏ, sản lượng mỏ, công suất nhà máy xi măng, chi phí khai thác, chi phí mua phụ gia được tích hợp trong mô hình, đã được giải quyết bằng công cụ CPLEX của Matlab. Ngoài ra, hiệu quả của mô hình so với phương pháp truyền thống được xác định trên kết quả thực nghiệm tại mỏ đá vôi Lèn Áng cung cấp cho nhà máy xi măng Vạn Ninh - Việt Nam. Việc sử dụng mô hình mang lại những hiệu quả đáng kể trong phối trộn nguyên liệu thô thông qua trung hòa đá vôi tại mỏ để đạt chất lượng mong muốn.

Từ khóa: Đá vôi, kế hoạch sản xuất, Lèn Áng, mô hình toán học, xi măng.

1 Mở đầu

Nhìn chung, sản xuất xi măng đòi hỏi bốn hoạt động chính như sau:

- Khai thác và nghiền nguyên liệu thô từ các mỏ đá;
- Tiền phối trộn và pha trộn để phát triển hỗn hợp nguyên liệu thô từ các mỏ đá và các phụ gia điều chỉnh được mua từ thị trường theo yêu cầu về chất lượng;
- Chế biến hỗn hợp nguyên liệu thô để tạo clinker;
- Nghiền clinker để sản xuất các sản phẩm cuối cùng của xi măng.

Đá vôi là nguyên liệu chính để sản xuất xi măng vì thành phần khoáng hóa của đá vôi thỏa mãn về chất lượng và số lượng các oxit như CaO , SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Tuy nhiên, trong đá vôi cũng tồn tại một số hợp chất gây hại cho quá trình sản xuất xi măng cũng như chất lượng sản phẩm như MgO , SO_3 , K_2O , Na_2O , TiO_2 , P_2O_5 , và Cl ,... Ngoài ra, chất lượng của đá vôi trên các tầng khai thác tại mỏ là không đồng nhất. Để kiểm soát chất lượng, đá vôi sau khi khai thác và nghiền được

trộn với nhau hoặc với các nguyên liệu điều chỉnh như đá sa thạch, đất sét, tro bay, quặng sắt,... mua từ thị trường. Do đó, chi phí nguyên liệu để sản xuất xi măng sẽ bao gồm chi phí khai thác đá vôi và chi phí mua nguyên liệu điều chỉnh.

Sản lượng xi măng thế giới ước tính khoảng 4.100 triệu tấn và có xu hướng tăng cao do nhu cầu xây dựng. Việt Nam nằm trong số 10 nước sản xuất xi măng lớn nhất thế giới [1]. Trữ lượng đá vôi của Việt Nam theo báo cáo ước tính khoảng 11 tỷ tấn, có chất lượng tốt đáp ứng mọi tiêu chuẩn để sản xuất xi măng [2]. Để sản xuất một tấn xi măng cần khoảng 1,6 tấn nguyên liệu thô [3]. Điều đó có nghĩa là nếu tiết kiệm chi phí nguyên liệu cho mỗi tấn là 1 đô la sẽ dẫn tới tổng tiết kiệm tích lũy là hàng tỷ đô la. Do đó, việc giảm chi phí nguyên liệu là chìa khóa cho hiệu quả sản xuất xi măng.

Một số công nghệ như phân tích hóa “ướt”, phân tích X-ray sử dụng máy tính để kiểm soát quá trình đã được áp dụng để giám sát chất lượng và khối lượng nguyên liệu thô [4]. Những công nghệ giám sát này cho phép các máy tính tác

động đến việc ra quyết định trong quá trình sản xuất nhưng ít khi đóng một vai trò tương tự trong khai thác đá vôi và những nguyên liệu khác để chế biến bởi vì một khi đá vôi đã đưa vào hệ thống nghiền thì không thể loại bỏ ra được [5]. Điều này có nghĩa rằng, nếu đá vôi có chất lượng kém được đưa vào hỗn hợp nguyên liệu thì cần phải đưa thêm phụ gia điều chỉnh. Do đó, chi phí mua nguyên liệu điều chỉnh phải được đưa vào trong giá thành nguyên liệu đầu vào.

Trên quan điểm tiết kiệm chi phí, việc trộn nguyên liệu thô nên được thực hiện ở giai đoạn khai thác. Tại đó, đá vôi có thể khai thác một cách chọn lọc để phối trộn với nguyên liệu điều chỉnh trong kho dự trữ với chi phí tối ưu. Những nhiệm vụ này có thể được thực hiện bởi kế hoạch sản xuất dài hạn và ngắn hạn của mỏ. Kế hoạch dài hạn đóng vai trò trong việc định hướng tất cả các kế hoạch ngắn hạn để đạt được hoạt động kinh tế chung. Ở mức độ kế hoạch ngắn hạn, cần phải nắm rõ hầu hết những thông tin về thân khoáng sản, giá trị kinh tế và điều kiện sản xuất. Đồng thời, thời gian quy định cho kế hoạch ngắn hạn là khá ngắn (một tuần hoặc ba tháng). Như vậy, bất kỳ thay đổi hoặc kết quả lập kế hoạch có thể được kiểm tra và cập nhật để phản ánh cho các điều kiện thực tế khai thác mỏ. Trong hoạt động xuất xi măng, quá trình trộn tại kho dự trữ được thực hiện trong thời gian ngắn. Do đó, kế hoạch sản xuất ngắn hạn đóng vai trò quan trọng để đạt được các yêu cầu về khối lượng và chất lượng cho kho dự trữ.

Hiện nay, phương pháp “Thử và sai” sử dụng bảng tính MS Excel hoặc chương trình Computer Aided Design (CAD) được áp dụng để phát triển quá trình pha trộn nguyên liệu thô thông qua kế hoạch sản xuất ngắn hạn [6-7]. Do số lượng các yếu tố để xem xét là lớn nên phương pháp này không phù hợp cho việc lập kế hoạch tối ưu mỏ dài hạn [8]. Tuy nhiên, những vấn đề này có thể được giải quyết một cách hiệu quả bởi các hoạt động kỹ thuật nghiên cứu sử dụng mô hình toán

học để tìm kế hoạch sản xuất tối ưu của mỏ. Phần lớn các nghiên cứu chủ yếu tập trung vào kế hoạch sản xuất ngắn hạn và phối trộn nguyên liệu thô áp dụng cho việc khai thác quặng kim loại. Các nghiên cứu có hiệu quả gần đây có thể kể đến bao gồm [9-13].

Giải pháp cho vấn đề lập kế hoạch sản xuất ngắn hạn của mỏ đá cung ứng nguyên liệu cho nhà máy xi măng khác so với quặng kim loại [14,15] do đầu vào cơ bản cho hai vấn đề đều là các khối và mục tiêu của quá trình phối trộn. Trong các hoạt động khai thác các khoáng sàng quặng kim loại bằng phương pháp lộ thiên, mỗi khối được gán một giá trị kinh tế dương hoặc âm tương ứng với quặng hoặc đất đá thải. Trong khi, đối với hoạt động khai thác đá vôi, mỗi khối được gán giá trị định lượng tương ứng với phần trăm hàm lượng của mỗi thành phần hóa học cần thiết cho sản xuất xi măng. Mục tiêu pha trộn các nguyên liệu có chất lượng tốt và kém trong quá trình khai thác quặng lộ thiên là đạt được hàm lượng yêu cầu của một chất kim loại thông qua nhiều quá trình trong nhà máy. Tuy nhiên, mục đích pha trộn nguyên liệu thô trong sản xuất xi măng là đạt được hàm lượng yêu cầu của nhiều thành phần hóa học được đưa vào trong lò xi măng.

Một vài phương pháp để lập kế hoạch hoạt động mỏ đá vôi được giới thiệu trong tài liệu tham khảo [16], tác giả đã đưa ra một mô hình chương trình tuyến tính lớn để mô tả quá trình sản xuất xi măng từ khi khai thác mỏ đá đến khi thành sản phẩm bán ra thị trường. Bằng việc đưa các thành phần của clinker và tối ưu hóa lập lịch kế hoạch của mỏ đá và đưa chúng vào mô hình, thực hiện tối ưu hóa đồng để tối đa hóa giá trị hiện tại ròng (NPV), tuổi thọ của mỏ hoặc tối ưu hóa quá trình sản xuất. Tài liệu [17] phát triển một mô hình tuyến tính cho việc lập kế hoạch sản xuất ngắn hạn nhiều giai đoạn cho các hoạt động khai thác mỏ đá phục vụ sản xuất xi măng. Mô hình này cố gắng giảm thiểu chi phí nguyên liệu

thô phát triển trong kho phối trộn phụ thuộc vào số lượng và chất lượng yêu cầu. Tài liệu [18] cũng giới thiệu các kỹ thuật lập trình để xây dựng các kế hoạch khai thác thay thế cho mỏ, đảm bảo về mặt hình học (góc dốc) và giới hạn về công suất của nhà máy xi măng. Tài liệu [19] giới thiệu một mô hình tuyến tính số nguyên cho việc lập kế hoạch sản xuất ngắn hạn của các mỏ đá phục vụ cho các nhà máy xi măng. Đầu vào cơ bản của mô hình là những block khai thác mỏ, mỗi block đã được gán một biến số nguyên (0-1). Mô hình sẽ đề xuất trình tự khai thác các block này sao cho đảm bảo khối lượng và chất lượng phối trộn yêu cầu và thỏa mãn với chi phí là nhỏ nhất có thể.

Trong bài báo này, nhóm tác giả phát triển mô hình tuyến tính mới, là công cụ để lập kế hoạch sản xuất ngắn hạn cho các mỏ đá khai thác phục vụ sản xuất xi măng. Mô hình này có những đặc điểm khác so với các nghiên cứu trước đây như sau:

- i) Mô hình xem xét đến trữ lượng đá vôi sẵn sàng để khai thác của mỏ.
- ii) Mô hình xem xét đến sản lượng khai thác của mỏ đá cũng như công suất nhà máy xi măng.
- iii) Mô hình có tính linh hoạt cao, cho phép đánh giá, lựa chọn kế hoạch thích hợp thông qua việc dễ dàng sửa đổi các công thức lập trình tuyến tính.

Mô hình sẽ là một công cụ tốt kết nối hoạt động khai thác mỏ với các quá trình tiếp theo trong nhà máy xi măng và góp phần phát triển bền vững nguồn tài nguyên nguyên liệu.

2 Các yêu cầu phối trộn nguyên liệu thô trong sản xuất xi măng

Đá vôi sau khi khai thác tại mỏ được đưa vào các kho dự trữ để chuẩn bị phối trộn hoặc được trộn trong các silo. Mục tiêu của lập kế hoạch sản xuất ngắn hạn trong các mỏ đá vôi xi măng là khai thác được càng nhiều hỗn hợp thô càng tốt, đảm bảo về số khối lượng và chất lượng của nhà máy chế biến. Về cơ bản, có ba yêu cầu cho hỗn

hợp thô như sau:

i) Phần trăm hàm lượng hóa học của nguyên liệu thô phải nằm trong giới hạn chấp nhận được: $14,00 \leq \text{SiO}_2 \leq 15,00$; $2,70 \leq \text{Al}_2\text{O}_3 \leq 3,40$; $1,65 \leq \text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 2,17$; $40,00 \leq \text{CaO} \leq 42,00$; $35,00 \leq \text{LOI} \leq 40,00$; $0,00 \leq \text{MgO} \leq 2,00$; $0,00 \leq \text{N}_2\text{O} \leq 0,50$; $0,00 \leq \text{K}_2\text{O} \leq 0,50$ [20].

ii) Tỷ lệ cân bằng của các oxit silic (SiO_2), nhôm (Al_2O_3) và sắt (Fe_2O_3) phải đạt được. Các chỉ số, modul silic (SR), hệ số bão hòa đá vôi (LSF) và modul nhôm (AM) thể hiện trong các phương trình (1)-(3) sẽ giúp đạt được sự cân bằng của các oxit chính:

$$2,29 \leq \text{SR} = \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \leq 2,60 \quad (1)$$

$$0,845 \leq \text{LSF} = \frac{\text{CaO}}{2,8\text{SiO}_2 + 1,18\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,65\text{Fe}_2\text{O}_3} \leq 0,90 \quad (2)$$

$$1,15 \leq \text{AM} = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{Fe}_2\text{O}_3} \leq 2,00 \quad (3)$$

(iii) Hỗn hợp thô được đưa vào lò nung để sản xuất ra “clinker”. Clinker là hỗn hợp khoáng chất bao gồm alite ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), ký hiệu “ C_3S ”, belite ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), ký hiệu “ C_2S ”, aluminat ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), ký hiệu “ C_3A ”, và brownmillerite ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$), ký hiệu “ C_4AF ”. Phần trăm của các thành phần khoáng chất tổng hợp này cũng tạo ra sự cân bằng của các oxit CaO , SiO_2 , Al_2O_3 và Fe_2O_3 trong hỗn hợp thô như các phương trình (4)-(7) dưới đây [20]:

$$0,30 \leq \text{C}_3\text{S} = 4,071\text{CaO} - 7,60\text{SiO}_2 - 6,78\text{Al}_2\text{O}_3 - 1,43\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,35 \quad (4)$$

$$0,15 \leq \text{C}_2\text{S} = -3,071\text{CaO} + 8,6\text{SiO}_2 + 5,068\text{Al}_2\text{O}_3 - 1,079\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,2 \quad (5)$$

$$0,5 \leq \text{C}_3\text{S} = 2,65\text{Al}_2\text{O}_3 - 1,692\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,8 \quad (6)$$

$$0,5 \leq \text{C}_4\text{AF} = 3,043\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 0,8 \quad (7)$$

3 Mô hình toán tuyến tính

3.1 Đầu vào của mô hình toán tuyến tính

Theo tính chất, dữ liệu đầu vào cho mô hình lập kế hoạch sản xuất là không chắc chắn. Tuy nhiên, trong việc lập kế hoạch ngắn hạn, dữ liệu

đầu vào bao gồm mô hình khối địa chất, hàm lượng, chi phí, giá cả, tỉ lệ thu hồi và các ràng buộc trong khai thác thực tế, dựa trên các điểm ước tính tốt nhất hiện có tại thời điểm tối ưu hóa [20]. Mô hình có thể được chạy lại nếu có sự thay đổi hoặc nhập mới. Điều này cũng hoàn toàn phù hợp với thực tế ngành khai thác mỏ, trong đó dữ liệu mới được cập nhật hàng năm, hàng tháng, hàng tuần để giảm thiểu sự thiếu chắc chắn. Trong kế hoạch sản xuất ngắn hạn, thành phần hóa học của một khối hoặc một khu vực có thể biết từ các lỗ khoan thăm dò trong khu vực khai thác mỏ hoặc bằng cách phân tích phối lấy từ các lỗ khoan nổ mìn.

3.2 Các công thức toán học của mô hình tuyến tính

Các chỉ số, các thông số, các biến, hàm mục tiêu và các ràng buộc của mô hình được xác định dưới đây:

3.2.1 Các chỉ số

- + q – chỉ số mỏ đá, $q = 1, \dots, Q$;
- + b – chỉ số tầng khai thác, $b = 1, \dots, B$;
- + a – chỉ số chất phụ gia thêm vào (đá sa thạch, quặng sắt, tro bay, ...), $a = 1, \dots, A$;
- + p – chỉ số giai đoạn, trong đó $p = 1, \dots, P$;
- + c – chỉ số thành phần hóa học (Cao, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF,...), $c = 1, \dots, C$.

3.2.2 Các thông số

- + g_{cbqp} – thành phần hóa học (%) c của tầng b tại mỏ q trong giai đoạn p ;
- + g_{cap} – thành phần hóa học (%) c trong chất phụ gia a trong giai đoạn p ;
- + $g_{cp}^{\min}, g_{cp}^{\max}$ – giá trị nhỏ nhất và lớn nhất của thành phần hóa học (%) c trong giai đoạn p ;
- + $M_{bqp}^{\min}, M_{bqp}^{\max}$ – khối lượng (tấn) nhỏ nhất và lớn nhất của nguyên liệu thô khai thác được tại tầng b tại mỏ q trong giai đoạn p ;
- + $M_{ap}^{\min}, M_{ap}^{\max}$ – khối lượng (tấn) nhỏ nhất và lớn nhất của chất phụ gia a cần phải mua trên thị trường trong giai đoạn p ;

+ $O^{\min}, O^{\max}$ – công suất (tấn) nhỏ nhất và lớn nhất của xưởng pha trộn;

+ $E_{bqp}^{\min}, E_{bqp}^{\max}$ – công suất khai thác (tấn) nhỏ nhất và lớn nhất của tầng b tại mỏ q trong giai đoạn p ;

+ $S^{\min}, S^{\max}$ – công suất (tấn) nhỏ nhất và lớn nhất của kho dự trữ trong giai đoạn p ;

+ σ – hàng tồn kho (tấn) của kho dự trữ;

+ I_p – khối lượng tồn kho ban đầu (tấn) của kho dự trữ tại thời điểm cuối kỳ giai đoạn trước p ;

+ I_0 – khối lượng tồn kho ban đầu (tấn) của kho dự trữ;

+ C_{bqp} – chi phí (đồng/tấn) nguyên liệu thô từ tầng b tại mỏ q trong giai đoạn p ;

+ C_{ap} – chi phí (đồng/tấn) của chất điều chỉnh a mua tại thị trường trong giai đoạn p .

3.2.3 Các biến

+ X_{bqp} – khối lượng (tấn) của nguyên liệu thô được khai thác tại tầng b tại mỏ q giai đoạn p ;

+ Y_{ap} – khối lượng (tấn) chất điều chỉnh a mua tại thị trường trong giai đoạn p ;

+ Z_p – khối lượng (tấn) nguyên liệu thô chuyển từ kho dự trữ s tới trạm phối trộn o trong giai đoạn p .

3.2.4 Hàm mục tiêu

$$\text{Minimise } \sum_{p=1}^P \left(\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B C_{bqp} B_{ijkt} X_{bqp} + \sum_{a=1}^A C_{ap} Z_p \right) \quad (8)$$

3.2.5 Các ràng buộc

$$M_{bqp}^{\min} \leq X_{bqp} \leq M_{bqp}^{\max}, \forall p, q \quad (9)$$

$$M_{ap}^{\min} \leq Y_{ap} \leq M_{ap}^{\max}, \forall p, a \quad (10)$$

$$E_{bqp}^{\min} \leq E_{bqp} \leq E_{bqp}^{\max}, \forall p, b, q \quad (11)$$

$$O^{\min} \leq Z_p \leq O^{\max}, \forall p \quad (12)$$

$$S^{\min} \leq I_p \leq S^{\max}, \forall p \quad (13)$$

$$Z_p \leq I_{p-1} - \sigma, \forall p = 2, \dots, T \quad (14)$$

$$Z_1 \leq I_0 + \sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B X_{bqp} - \sigma, \quad (15)$$

$$I_p = I_0 + \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B X_{bqp} - Z_p, \forall p = 2, \dots, T, q, b \quad (16)$$

$$g_{cp}^{\min} \leq \frac{\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{cbqp} X_{bqp} + \sum_a g_{cap} Z_{ap}}{\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B X_{bqp} + \sum_a Z_{ap}} \leq g_{cp}^{\max}, \forall p, c \quad (17)$$

$$g_{cp}^{\min} \leq \frac{\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{(SiO_2)bqp} X_{bqp} + \sum_a g_{(SiO_2)ap} Z_{ap}}{\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B X_{bqp} + \sum_a Z_{ap}} \leq g_{cp}^{\max}, \forall p \quad (18)$$

$$\left[\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{(Al_2O_3)bqp} X_{bqp} + \sum_a g_{(Al_2O_3)ap} Z_{ap} \right] + \left[\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{(Fe_2O_3)bqp} X_{bqp} + \sum_a g_{(Fe_2O_3)ap} Z_{ap} \right]$$

$$g_{cp}^{\min} \leq \frac{\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{(CaO)bqp} X_{bqp} + \sum_a g_{(CaO)ap} Z_{ap}}{\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B X_{bqp} + \sum_a Z_{ap}} \leq g_{cp}^{\max}, \forall p \quad (19)$$

$$\left[2,80 \left[\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{(SiO_2)bqp} X_{bqp} + \sum_a g_{(SiO_2)ap} Z_{ap} \right] + 1,18 \left[\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{(Al_2O_3)bqp} X_{bqp} + \sum_a g_{(Al_2O_3)ap} Z_{ap} \right] + 0,65 \left[\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{(Fe_2O_3)bqp} X_{bqp} + \sum_a g_{(Fe_2O_3)ap} Z_{ap} \right] \right]$$

$$g_{cp}^{\min} \leq \frac{\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{(Al_2O_3)bqp} X_{bqp} + \sum_a g_{(Al_2O_3)ap} Z_{ap}}{\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B X_{bqp} + \sum_a Z_{ap}} \leq g_{cp}^{\max}, \forall p \quad (20)$$

$$\left[\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{(Fe_2O_3)bqp} X_{bqp} + \sum_a g_{(Fe_2O_3)ap} Z_{ap} \right]$$

$$g_{cp}^{\min} \leq \frac{\left[4,071 \left[\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{(CaO)bqp} X_{bqp} + \sum_a g_{(CaO)ap} Z_{ap} \right] - 7,600 \left[\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{(SiO_2)bqp} X_{bqp} + \sum_a g_{(SiO_2)ap} Z_{ap} \right] - 6,718 \left[\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{(Al_2O_3)bqp} X_{bqp} + \sum_a g_{(Al_2O_3)ap} Z_{ap} \right] - 1,430 \left[\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{(Fe_2O_3)bqp} X_{bqp} + \sum_a g_{(Fe_2O_3)ap} Z_{ap} \right] \right]}{\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B X_{bqp} + \sum_a Z_{ap}} \leq g_{cp}^{\max}, \forall p \quad (21)$$

$$g_{cp}^{\min} \leq \frac{\left[2,650 \left[\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{(Al_2O_3)bqp} X_{bqp} + \sum_a g_{(Al_2O_3)ap} Z_{ap} \right] - 1,692 \left[\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{(Fe_2O_3)bqp} X_{bqp} + \sum_a g_{(Fe_2O_3)ap} Z_{ap} \right] \right]}{\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B X_{bqp} + \sum_a Z_{ap}} \leq g_{cp}^{\max}, \forall p \quad (22)$$

$$g_{cp}^{\min} \leq \frac{\left[-3,071 \left[\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{(CaO)bqp} X_{bqp} + \sum_a g_{(CaO)ap} Z_{ap} \right] + 8,600 \left[\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{(SiO_2)bqp} X_{bqp} + \sum_a g_{(SiO_2)ap} Z_{ap} \right] + 5,068 \left[\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{(Al_2O_3)bqp} X_{bqp} + \sum_a g_{(Al_2O_3)ap} Z_{ap} \right] - 1,079 \left[\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{(Fe_2O_3)bqp} X_{bqp} + \sum_a g_{(Fe_2O_3)ap} Z_{ap} \right] \right]}{\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B X_{bqp} + \sum_a Z_{ap}} \leq g_{cp}^{\max}, \forall p \quad (23)$$

$$g_{cp}^{\min} \leq \frac{3,043 \left[\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B g_{(Fe_2O_3)bqp} X_{bqp} + \sum_a g_{(Fe_2O_3)ap} Z_{ap} \right]}{\sum_{q=1}^Q \sum_{b=1}^B X_{bqp} + \sum_a Z_{ap}} \leq g_{cp}^{\max}, \forall p \quad (24)$$

Mục tiêu của mô hình đề xuất được đưa ra theo (8) là giảm thiểu tổng chi phí quặng nguyên liệu thô từ hai nguồn chính. Ràng buộc (9) và (10) đảm bảo rằng khối lượng nguyên liệu thô sẵn có được di chuyển từ các tầng của mỏ đá và khối lượng chất điều chỉnh phải nằm trong giới hạn tối đa và tối thiểu cho phép. Ràng buộc (11) giữ khối lượng nguyên liệu thô từ mỗi tầng trong khả năng của thiết bị hoạt động trên tầng đó. Ràng buộc này cũng buộc mô hình phải loại bỏ vật liệu thải hoặc khai thác tầng sau khi đáp ứng các yêu cầu về kho dự trữ. Ràng buộc (12)-(16) đảm bảo luồng nguyên liệu từ kho dự trữ đến trạm phối trộn. Ràng buộc (12) đáp ứng công suất lớn nhất và nhỏ nhất của trạm phối trộn. Theo ràng buộc này, tổng khối lượng của nguyên liệu thô được đưa vào trạm phối trộn sẽ không được lớn hơn công suất tối đa của trạm phối trộn. Ngoài ra, lượng này không được nhỏ hơn lượng yêu cầu tối thiểu của trạm phối trộn. Ràng buộc (13) yêu cầu khối lượng tồn của kho dự trữ phải lớn hơn công suất của kho dự trữ nguyên liệu phối trộn và nhỏ hơn công suất của kho dự trữ. Ràng buộc (16) giới thiệu khối lượng hàng tồn cân đối của kho dự trữ trong ròng nguyên liệu. Ràng buộc (7)-(24) được áp dụng để kiểm soát chất lượng nguyên liệu thô. Ràng buộc (17) đảm bảo phần trăm hàm lượng yêu cầu tối thiểu của CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, K₂O, Na₂O.... Phương trình (18)-(20) tương ứng với các ràng buộc của là hệ modul silic, hệ số bão hòa đá vôi và modul nhôm.

4 Áp dụng mô hình trong công tác lập kế hoạch tại mỏ đá vôi Lèn Áng cung cấp nguyên liệu cho nhà máy xi măng Vạn Ninh

4.1 Dữ liệu đầu vào

Mô hình đề xuất đã được áp dụng cho hoạt động khai thác đá vôi xi măng ở tỉnh Quảng Bình, Việt Nam. Nhà máy xi măng hoạt động dựa trên nguồn nguyên liệu khai thác từ mỏ đá vôi và mỏ sét. Mỏ đá vôi khai thác đồng thời năm tầng, khối lượng và chất lượng thành phần hóa trên từng tầng, chi phí khai thác đá vôi từ mỏ đá bao gồm

chi phí khoan, nổ mìn, xúc bốc và vận chuyển. Các chi phí này thay đổi theo các tầng khác nhau phụ thuộc chủ yếu vào khoảng cách vận tải giữa các vị trí bốc-dỡ trên một tầng và với trạm nghiền được thể hiện tại bảng 1. Mỏ sét bao gồm một tầng được khai thác bằng máy xúc thủy lực gầu

ngược, khối lượng, chất lượng thành phần hóa cũng như chi phí cho việc cung cấp đất sét từ mỏ này được thể hiện trong bảng 1. Chất phụ gia sử dụng sa thạch, tro bay và quặng được mua từ thị trường. Khối lượng, chất lượng và chi phí của các chất điều chỉnh được thể hiện trong bảng 1.

Bảng 1. Các thông số đầu vào của mô hình toán tuyến tính lập kế hoạch khai thác cho mỏ đá vôi xi măng Lèn Áng

Giai đoạn	Vị trí khai thác		Khối lượng (tấn)		Thành phần hóa (%)								Chi phí (đ/tấn)
			Tối thiểu	Tối đa	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	LOI	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	
1	Mỏ đá	Tầng 1	1000	2500	48,20	3,25	1,78	1,12	44,05	0,98	0,34	0,21	21.735
		Tầng 2	3000	4500	45,50	5,50	1,00	1,25	44,23	1,86	0,21	0,34	24.426
		Tầng 3	3000	4000	50,50	2,46	1,70	0,20	44,15	2,54	0,21	0,32	27.048
		Tầng 4	1000	2500	51,05	2,60	0,82	1,05	43,08	2,79	0,35	0,15	28.842
		Tầng 5	1000	2500	43,50	9,56	1,45	1,05	41,91	1,50	0,45	0,25	29.187
	Mỏ sét	Tầng 1	1500	3000	9,89	51,50	11,34	5,15	17,67	2,50	0,56	0,29	74.934
	Phụ gia	Sa thạch	400	1100	0,72	75,00	9,97	5,06	7,63	1,09	0,15	0,44	17.388
		Tro bay	0	500	2,56	60,50	13,56	6,25	16,43	1,75	0,15	0,18	19.941
		Quặng sắt	0	150	1,98	28,09	12,69	36,24	17,83	1,43	0,78	0,22	374.187
2	Mỏ đá	Tầng 1	2000	3000	48,00	3,50	1,83	1,21	43,15	1,05	0,32	0,29	19.113
		Tầng 2	2500	3500	50,50	5,50	0,99	1,36	43,24	1,34	0,45	0,31	21.528
		Tầng 3	4000	5000	50,50	2,00	1,50	0,30	44,00	2,90	0,19	0,32	27.600
		Tầng 4	1500	2500	51,05	2,60	0,95	1,25	41,91	3,05	0,28	0,25	26.841
		Tầng 5	1000	2500	45,01	9,50	1,99	1,36	42,05	1,99	0,45	0,25	30.015
	Mỏ sét	Tầng 1	1500	3000	10,18	51,50	11,89	5,00	17,89	3,06	0,27	0,19	74.934
	Phụ gia	Sa thạch	400	1500	0,79	75,00	10,30	5,35	7,50	1,23	0,35	0,35	17.388
		Tro bay	0	500	2,63	59,50	13,25	6,15	16,25	1,44	0,24	0,24	19.941
		Quặng sắt	0	150	1,98	29,50	12,69	36,13	17,96	0,93	0,41	0,41	374.187
3	Mỏ đá	Tầng 1	1500	4000	47,50	2,85	1,84	1,02	44,05	0,99	0,27	0,27	22.839
		Tầng 2	3000	4000	51,00	5,50	1,25	1,45	44,24	1,80	0,25	0,25	23.736
		Tầng 3	4000	5000	50,50	2,10	1,50	0,30	44,56	2,50	0,24	0,24	26.151
		Tầng 4	2000	3000	52,00	2,64	0,85	1,24	41,32	2,99	0,30	0,30	28.842
		Tầng 5	1500	2000	45,38	9,50	1,99	1,05	41,07	2,99	0,30	0,25	29.187
	Mỏ sét	Tầng 1	1500	4000	10,18	50,50	11,89	5,15	18,00	2,36	0,27	0,19	74.934
	Phụ gia	Sa thạch	500	2000	0,80	75,00	10,40	5,48	7,32	1,23	0,35	0,35	17.388
		Tro bay	0	400	2,63	59,23	13,25	6,25	16,88	1,44	0,24	0,24	19.941
		Quặng sắt	0	200	2,00	29,50	12,75	36,12	18,23	0,93	0,41	0,41	374.187

4.2 Giải quyết mô hình

Mô hình tuyến tính được ứng dụng để tối ưu hóa kế hoạch sản xuất cho 3 giai đoạn của mỏ. Công suất nhà máy xi măng khoảng 1,25 triệu tấn/năm. Để giải quyết vấn đề này, tác giả sử dụng công cụ CPLEX phiên bản 12.10 được chạy trên chương trình Matlab. Phần mềm Matlab cũng được sử dụng để chuẩn bị các ma trận ràng

buộc, các biến và hàm mục tiêu. Matlab cũng được sử dụng để gọi bộ giải để chạy mã và giải mô hình mô hình tuyến tính. Phần code của thuật toán được chạy trên máy tính Dell Precision M4800 lõi tứ kép tốc độ 2,70 GHz với 32 GB RAM. Các yêu ràng buộc đối với vấn đề lập kế hoạch khai thác mỏ đá vôi xi măng được tóm tắt trong bảng 2.

Bảng 2. Các ràng buộc đối với vấn đề lập kế hoạch khai thác dài hạn mỏ đá vôi xi măng

Chỉ số	Giới hạn ràng buộc (%)	
	Giới hạn dưới	Giới hạn trên
CaO (%)	40,00	41,00
SiO ₂ (%)	14,00	15,00
Al ₂ O ₃ (%)	2,70	3,40
Fe ₂ O ₃ (%)	1,65	2,17
LOI	35,00	41,00
MgO	0,00	2,00
Na ₂ O	0,00	0,50
K ₂ O	0,00	0,50
Hệ số bão hòa vôi (LSF)	0,845	0,90
Mô đun silicat (SR)	2,60	2,90
Mô đun aluminat (AM)	1,50	2,00
C ₃ S (%)	30,00	35,00
C ₂ S (%)	15,00	20,00
C ₃ A (%)	5,00	8,00
C ₄ AF (%)	5,00	8,00

Giải pháp tối ưu có được đã giảm thiểu chi phí nguyên liệu thô cho ba giai đoạn sản xuất là 1.132.017.450 đ. Chi phí cung cấp nguyên liệu thô trong các giai đoạn 1, 2 và 3 lần lượt là 387.351.510 đ, 369.688.200 đ và 374.977.740 đ. Lịch kế hoạch khai thác tối ưu đảm bảo cung cấp 15.000 tấn hỗn hợp thô cho nhà máy xi măng trong từng thời kỳ, do đó chi phí cho mỗi tấn hỗn hợp thô trong các giai đoạn 1, 2 và 3 lần lượt ở mức 25.823,434 đ, 24.645,88 đ và 24.998,516 đ. Bên cạnh đó đáp ứng đồng thời các yêu cầu về

khối lượng và chất lượng của các thành phần hóa. Bảng 3 thể hiện lịch kế hoạch khai thác tối ưu đã đáp ứng được các ràng buộc về khối lượng và chất lượng của các thành phần hóa.

Mô hình toán đã tạo ra giải pháp khai thác khả thi và thỏa mãn các ràng buộc về yêu cầu chất lượng của các thành phần hóa cũng như các chỉ số trong sản xuất xi măng trên cơ sở chất lượng các thành phần hóa của đá vôi, đất sét và chất phụ gia với giá thành nhỏ nhất.

Phương pháp xây dựng hàm mục tiêu về chi phí giá thành khai thác và nguyên liệu khoáng cần thiết trong trung hòa tại từng tầng khai thác trên mỏ đá từ đó lập kế hoạch khai thác trong ngắn hạn cho mỏ đảm bảo ổn định chất lượng các nguyên liệu khoáng cung cấp cho nhà máy xi măng. Các kết quả này có thể được vận dụng và áp dụng cho các mỏ đá có điều kiện chất lượng đá vôi phân bố phức tạp và không đồng đều. Quá trình lập kế hoạch khai thác trong ngắn hạn giúp ta lựa chọn hệ thống khai thác hợp lý nhằm tăng số lượng gương xúc và trung hòa trong quá trình khai thác mỏ đá vôi. Vì vậy, trong khai thác mỏ đá xi măng hàm mục tiêu là trung hòa chất lượng đá nguyên liệu đủ hàm lượng các nguyên liệu khoáng và sản lượng theo yêu cầu.

Bảng 3. Kết quả tối ưu hóa kế hoạch khai thác mỏ đá vôi xi măng

Vị trí		Khối lượng (tấn)			Hàm lượng (%)			
		Giai đoạn 1	Giai đoạn 2	Giai đoạn 3	Chỉ số	Giai đoạn 1	Giai đoạn 2	Giai đoạn 3
Mỏ đá	Tầng 1	1500	3354	1500	CaO	40,25	40,17	40,20
	Tầng 2	4632	3330	4244	SiO ₂	14,41	14,66	14,84
	Tầng 3	3000	1500	3000	Al ₂ O ₃	3,26	3,40	3,34
	Tầng 4	1500	2416	1805	Fe ₂ O ₃	1,71	1,77	1,78
	Tầng 5	1500	1500	1500	LOI	38,34	37,57	37,84
Mỏ sét	Tầng 1	386	377	232	MgO	2,00	1,72	2,00
Sản lượng mỏ		12132	12100	12049	Na ₂ O	0,32	0,31	0,27
Phụ gia	Sa thạch	2082	2123	2319	K ₂ O	0,27	0,29	0,26
	Tro bay	400	400	400	Mô đun silicat	2,90	2,83	2,90
	Quặng sắt	0	0	0	Hệ số bão hòa vôi	0,89	0,89	0,88
Tổng khối lượng nguyên liệu thô		15000	15000	15000	Mô đun aluminat	1,91	1,92	1,87
					C ₃ S	30,00	30,77	30,00
					C ₃ A	15,00	15,00	16,07
					C ₂ S	5,76	6,01	5,82
					C ₄ AF	5,19	5,40	5,42

5 Kết luận

Đá vôi là nguyên liệu chính để sản xuất xi măng do thành phần khoáng hóa của đá vôi thỏa mãn về chất lượng và số lượng các oxit như Cao, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 . Sự tồn tại của một nhà máy xi măng phụ thuộc rất nhiều vào sự trung hòa chính xác của các nguồn nguyên liệu thô để tạo ra sản phẩm cuối cùng có chất lượng chấp nhận được.

Tối ưu hóa kế hoạch khai thác mỏ đá vôi xi măng là một thách thức đối với ngành khai thác mỏ. Trái ngược với cách tiếp cận “Thử và sai” thủ công, nghiên cứu này đã cố gắng đóng góp một giải pháp tối ưu cho vấn đề tối ưu hóa phức

tạp và quy mô lớn.

Nghiên cứu này đã phát triển một mô hình toán tuyến tính hỗ trợ cho các kỹ sư mỏ dễ dàng hơn trong việc lập kế hoạch khai thác các mỏ đá vôi nguyên liệu xi măng. Phương pháp được trình bày trong nghiên cứu này đã chứng minh khắc phục những nhược điểm liên quan đến phương pháp “Thử và sai”. Mô hình toán được phát triển giúp kỹ sư khai thác mỏ giải quyết một số vấn đề như: Tạo ra sự phối hợp nhịp nhàng giữa nhà máy xi măng và mỏ đá vôi nguyên liệu; kiểm soát tốt hơn chất lượng của đá vôi nguyên liệu cũng như số lượng phụ gia cần mua; giảm thiểu chi phí nguyên liệu thô để sản xuất xi măng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/cement/mcs-2016-cemen.pdf>.
2. Vietnam Cement Production Plant. *Vietnam National Cement Coporation, Vietnam, 2000*.
3. **Austin George T.** Shreve's Chemical Process Industries, *5th Edition, McGraw Hill Book Company New York, 1984*.
4. **Labahn Kohlhaas.** Cement Engineer's Handbook. *Bauverlag GmbH, Wiesbaden and Berlin, 1983, PP.117-118*.
5. **Mark E. Gershon.** Mathematical Programming Applied to Cement Plant and Quarry Operations. *Applied mathematics and computation 16, 1985, PP. 165-176*.
6. **Baumgartner W.** Latest Innovations in Quarry Design and Management. *International Cement Review, 1989*.
7. **Baumgartner W., Honerkamp M.** Quarry Engineering Design, A Further Step in Computerized Raw Materials Management. *International Cement Review, 1992*.
8. **Asad M.W.A.** Development of Optimum Blend/Minimum Cost Scheduling Algorithm for Cement Quarry Operations. *Ph.D. Dissertation, Colorado School of Mines, USA, 2001*.
9. **Ramazan S., Dagdelen K., Johnson T.B.** Fundamental Tree Algorithm in Optimizing production Scheduling for Open Pit Mine Design. *Mining Technology: IMMTransactions Section A, 114(1), 2005, PP. 45-54*.
10. **Abrishamifar S. Amir.** ORE Extraction and Blending Optimization Model in Poly-Metallic Open PIT Mines By Chance Constrained One-Sided Goal Programming. *J. Ind. Eng. Int 7.15, 2011, PP. 60-67*.
11. **Eivazy H., Askari-Nasab H.** A Mixed Integer Linear Programming Model for Short-Term Open Pit Mine Production Scheduling. *Mining Technology. Vol 121, 2012, PP. 97-108*.
12. **Gholamnejad J., Kasmaee S.** Optimum Blending of Iron Ore From Choghart Stockpiles by Using Goal Programming. *Journal of Central South University 19.4.2012, PP. 1081-1085*.
13. **Eivazy H., Amin Mousavi, et al.** Comparative Analysis of Three Metaheuristics for Short-Term Open Pit Block Sequencing. *Journal of Heuristics, Vol 2, 2016, PP. 1-32*.