

TỐI ƯU HÓA KẾ HOẠCH KHAI THÁC DÀI HẠN CÁC MỎ ĐÁ VÔI XI MĂNG SỬ DỤNG LẬP TRÌNH TUYẾN TÍNH SỐ NGUYÊN HỖN HỢP

TRẦN ĐÌNH BẢO, NGUYỄN ANH TUẤN,
PHẠM VĂN VIỆT, NGUYỄN ĐÌNH AN, NHỮ VĂN PHÚC
Trường Đại học Mỏ-Địa chất
ĐOÀN VĂN THANH
Viện Khoa học Công nghệ Mỏ - Vinacomin
Email: trandinhbao@humg.edu.vn

TÓM TẮT

Kỹ thuật tối ưu hóa kế hoạch khai thác mỏ thường không phổ biến trong khai thác mỏ đá vôi xi măng. Bài báo này giới thiệu mô hình tối ưu mới dựa trên lập trình số nguyên hỗn hợp cùng với phương pháp giải hiệu quả để giải quyết vấn đề lập kế hoạch dài hạn cho các mỏ đá vôi xi măng. Một phương pháp bao gồm nhiều bước đã được áp dụng để giải quyết bài toán lập kế hoạch dài hạn cho các mỏ đá vôi xi măng. Mô hình toán học đã được áp dụng tại mỏ đá vôi Tà Thiết – Bình Phước, các giải pháp đưa ra của mô hình cho thấy khả năng tạo ra lịch kế hoạch khai thác tối ưu với các điều kiện thực tế khai thác tại mỏ.

Từ khóa: mỏ đá vôi xi măng, hỗn hợp thô, kế hoạch khai thác mỏ dài hạn, mô hình tuyến tính số nguyên hỗn hợp, vi khối, tối ưu.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Để sản xuất xi măng điều quan trọng nhất là tạo ra được một hỗn hợp nguyên liệu thô có thành phần hóa học nằm trong giới hạn xác định. Thông thường, đá vôi được khai thác từ các mỏ lộ thiên được phối trộn với nhau hoặc với các chất phụ gia mua trên thị trường. Để nhà máy xi măng hoạt động được liên tục và hiệu quả thì việc duy trì nguồn nguyên liệu thô với khối lượng, thành phần hóa tối ưu là chìa khóa tiên quyết để giải quyết vấn đề này. Một trong những nhiệm vụ quan trọng trong kế hoạch khai thác mỏ được gọi là lập lịch kế hoạch sản xuất, xác định vi khối nào được khai thác vào thời điểm nào để tối đa hóa giá trị hiện tại ròng của dự án. Đầu vào tiêu chuẩn để lập lịch kế hoạch khai thác mỏ là mô hình khối chứa đựng tập hợp các vi khối bao phủ toàn bộ thân khoáng sàng. Mỗi vi chứa đựng các thông tin về khối lượng và thành phần hóa học, vị trí của vi khối, ... tương ứng từng loại khoáng sản cần thiết cho việc thiết kế và tối ưu kế hoạch khai thác mỏ. Quá trình xây dựng mô hình được tiến hành từ khâu khoan thăm dò, xử lý thông tin lỗ khoan, kết hợp thông tin lỗ khoan, phân tích và nội suy các giá trị hàm lượng bằng cách sử dụng các thuật toán địa thống kê. Sau đó,

mỗi vi khối được gán một giá trị kinh tế xác định. Tuy nhiên, việc lập kế hoạch khai thác mỏ đá vôi xi măng dài hạn không thể dựa trên giá trị kinh tế của vi khối vì không thể sử dụng giá bán của xi măng trên thị trường để gán giá trị kinh tế cho từng vi khối, cũng như để phân loại quặng và đất đá thải (Asad, 2011). Việc sử dụng các phần mềm thương mại như Whittle (2016), MineMax (Minemax Pty Ltd., 2009),... sử dụng đầu vào là mô hình khối kinh tế để giải quyết vấn đề lập kế hoạch khai thác dài hạn cho các mỏ đá vôi xi măng được chỉ ra là không thực tế (Asad, 2011).

Mô hình tuyến tính số nguyên hỗn hợp đã được sử dụng rộng rãi để xử lý vấn đề lập lịch kế hoạch khai thác dài hạn cho các mỏ lộ thiên do khả năng mô hình hóa các ràng buộc khai thác đa dạng trong quá trình tối ưu. Tương tự như vấn đề lập kế hoạch khai thác mỏ lộ thiên, việc áp dụng mô hình MILP để giải quyết vấn đề lập kế hoạch khai thác dài hạn cho các mỏ đá vôi để sản xuất xi măng (đá vôi xi măng) cũng nảy sinh một số thách thức về quy mô của bài toán do sự gia tăng số lượng các vi khối và số lượng các giai đoạn lập kế hoạch. Ở đây, để giảm quy mô của bài toán toán lập lịch kế hoạch khai thác dài hạn cho các mỏ đá vôi xi măng người

ta bỏ qua các phân nhánh: xác định biên giới kết thúc khai thác mỏ, thiết kế các giai đoạn khai thác và lập lịch kế hoạch khai thác bởi sự khác biệt của đầu vào mô hình.

2. NỘI DUNG NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp nghiên cứu

Mục đích của nghiên cứu này là phát triển một mô hình tối ưu hóa MILP mới cùng với một phương pháp giải hiệu quả để giải quyết bài toán lập kế hoạch khai thác dài hạn cho các mỏ đá vôi xi măng. Hàm mục tiêu của mô hình là tối ưu hóa chi phí tạo ra hỗn hợp nguyên liệu thô cung cấp cho nhà máy xi măng đồng thời xem xét các ràng buộc trong khai thác mỏ, các ràng buộc về thành phần hóa, ràng buộc về phụ gia mua ngoài, Để đạt được mục tiêu nghiên cứu, tác giả đã phát triển một phương pháp bao gồm nhiều bước để giải quyết bài toán kế hoạch khai thác dài hạn mỏ đá vôi xi măng. Mô hình MILP hỗ trợ lập kế hoạch khai thác mỏ đá vôi xi măng được xây dựng trong môi trường Matlab.

2.2. Các ràng buộc về chất lượng đá vôi trong công nghiệp sản xuất xi măng

Chìa khóa thành công cho vấn đề lập kế hoạch khai thác dài hạn cho mỏ đá vôi xi măng là đảm bảo cung cấp đầy đủ hỗn hợp nguyên liệu thô cho nhà máy xi măng về khối lượng và chất lượng. Đá vôi được khai thác phải đảm bảo các yêu về tỷ lệ phần trăm thành phần hóa của các oxit như canxi oxit (CaO), silic oxit (SiO₂), nhôm oxit (Al₂O₃), oxit sắt (Fe₂O₃), magie oxit (MgO), kali oxit (K₂O), ... trong phạm vi chấp nhận được theo công nghệ sản xuất xi măng của nhà máy.

Trong sản xuất xi măng, việc phát triển hỗn hợp nguyên liệu thô phải đảm bảo cân bằng của các oxit kể trên thông qua các chỉ số sau silica (SR), hệ số bão hòa vôi (LSF) và tỷ lệ alumina (AM) và khoáng clinker bao gồm alit (3CaO.SiO₂) đại diện là "C₃S", belit (2CaO.SiO₂) đại diện là "C₂S", khoáng canxi aluminat (3CaO.Al₂O₃) đại diện là "C₃A", và khoáng Canxi aluminoferrit (4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃) đại diện là "C₄AF". Các phương trình từ (1) đến (7) biểu diễn các chỉ số này:

$$SR = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \tag{1}$$

$$LSF = \frac{CaO}{2,8SiO_2 + 1,18Al_2O_3 + 0,65Fe_2O_3} \tag{2}$$

$$AM = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \tag{3}$$

$$C_3S = 4,071CaO - 7,60SiO_2 - 6,78Al_2O_3 - 1,43Fe_2O_3 \tag{4}$$

$$C_2S = -3,071CaO + 8,6SiO_2 + 5,068Al_2O_3 - 1,079Fe_2O_3 \tag{5}$$

$$C_3A = 2,65Al_2O_3 - 1,692Fe_2O_3 \tag{6}$$

$$C_4AF = 3,043Fe_2O_3 \tag{7}$$

2.3. Mô hình lập trình tuyến tính số nguyên hỗn hợp trong công tác lập kế hoạch dài hạn cho các mỏ đá vôi xi măng

Chỉ số của mô hình

- t: Chỉ số giai đoạn lập kế hoạch, t = 1, 2, ..., T
- i: Vị trí của vi khối theo trục x, i = 1, ..., X
- j: Vị trí của vi khối theo trục y, j = 1, ..., Y
- k: Vị trí của vi khối theo trục z, k = 1, ..., Z
- a: chỉ số phụ gia thêm vào, trong đó a = 1, ..., A là các chất phụ gia bao gồm sét, đá phiến, đá ong, tro bay, quặng sắt,

c: chỉ số hóa học, trong đó c = 1, ..., C là các thành phần hóa học bao gồm CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, LOI, K₂O, Na₂O, và LS, SR, IM, C₂S, C₃S, C₃A, LSF,

Các thông số của mô hình

- B_{ijk}: Thể tích của vi khối i, j, k
- C_{ijkt}: chi phí khai thác (\$/tấn) vi khối x, y, z của mỏ trong giai đoạn t
- C_{at}: Chi phí phụ gia (\$/tấn) a được thêm vào trong giai đoạn t
- minP_t, maxP_t: Sản lượng lớn nhất và nhỏ nhất của mỏ (tấn) trong giai đoạn t
- minQ_{at}, maxQ_{at}: Khối lượng phụ gia a lớn nhất và nhỏ nhất được thêm vào (tấn) trong giai đoạn t
- minG_c, maxG_c: Phần trăm hóa học tối thiểu và tối đa c
- g_{cijk}: Phần trăm thành phần hóa c trong vi khối i, j, k
- g_{cat}: Phần trăm thành phần hóa c trong phụ gia a trong giai đoạn t
- N_{ijkt}, N_{ijkt}⁻, N_{ijkt}⁺: Số vi khối cần phải được khai

thác trước vi khối ijk để thỏa mãn ràng buộc vi khối ưu tiên trên mặt phẳng j và các mặt phẳng phía sau và phía trước mặt phẳng j và vuông góc với trục y tương ứng.

Các biến quyết định

$$X_{ijkt} = \begin{cases} 1, & \text{nếu vi khối } ijk \text{ được khai thác trong giai đoạn } t \\ 0 & \text{trường hợp khác.} \end{cases}$$

Y_{at} : Khối lượng (tấn) của chất phụ gia sử dụng trong giai đoạn t

Hàm mục tiêu

Hàm mục tiêu là tối thiểu chi phí tạo ra hỗn hợp nguyên liệu thô để sản xuất xi măng:

$$\sum_{t=1}^T \left(\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K X_{ijkt} B_{ijkt} C_{ijkt} + \sum_{a=1}^A C_{at} Y_{at} \right) \rightarrow \text{Min} \quad (8)$$

Các ràng buộc

$$\sum_{t=1}^T X_{ijkt} \leq 1, \forall i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K, \quad (9)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{k'=k+1}^K \sum_{i'=i-k}^{i+k'-k} X_{i'j'k't} - N_{ijkt} X_{ijkt} \geq 0, \forall i = 1, 2, \dots, I; j = 1, 2, \dots, J; k = 1, 2, \dots, K; i' > 0, \quad (10)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{k'=k+1}^K \sum_{j'=j+1}^J \sum_{i'=i-(k'-k+j-j')}^{j+k'-k} X_{i'j'k't} - N_{ijkt} X_{ijkt} \geq 0, \forall i = 1, 2, \dots, I; k = 1, 2, \dots, K; i' > 0, j \in [1, J], \quad (11)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{k'=k+1}^K \sum_{j'=j+1}^J \sum_{i'=i-(k'-k+j-j')}^{i+(k'-k+j-j')} X_{i'j'k't} - N_{ijkt}^+ X_{ijkt} \geq 0, \forall i = 1, 2, \dots, I; k = 1, 2, \dots, K; i' > 0, j \in [1, J], \quad (12)$$

$$\min P_t \leq \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K X_{ijkt} \leq \max P_t, \forall t = 1, 2, \dots, T, \quad (13)$$

$$\min Q_{at} \leq Y_{at} \leq \max Q_{at}, \forall a = 1, 2, \dots, A; t = 1, 2, \dots, T, \quad (14)$$

$$\min G_c \leq \frac{\left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{cijkt} X_{ijkt} B_{ijkt} + \sum_{a=1}^A g_{cat} Y_{at} \right]}{\left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K X_{ijkt} B_{ijkt} + \sum_{a=1}^A Y_{at} \right]} \leq \max G_c, \forall a = 1, 2, \dots, A; t = 1, 2, \dots, T, \quad (15)$$

$$\min G_c \leq \frac{\left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{(CaO)ijk} X_{ijkt} B_{ijkt} + \sum_{a=1}^A g_{(CaO)at} Y_{at} \right]}{\left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{(SiO_2)ijk} X_{ijkt} B_{ijkt} + \sum_{a=1}^A g_{(SiO_2)at} Y_{at} \right]} \leq \max G_c, \forall t = 1, 2, \dots, T$$

$$+ 1,18 \left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{(Al_2O_3)ijk} X_{ijkt} B_{ijkt} + \sum_{a=1}^A g_{(Al_2O_3)at} Y_{at} \right]$$

$$+ 0,65 \left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{(Fe_2O_3)ijk} X_{ijkt} B_{ijkt} + \sum_{a=1}^A g_{(Fe_2O_3)at} Y_{at} \right] \quad (16)$$

$$\min G_c \leq \frac{\left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{(SiO_2)ijk} X_{ijkt} B_{ijkt} + \sum_{a=1}^A g_{(SiO_2)at} Y_{at} \right]}{\left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{(Al_2O_3)ijk} X_{ijkt} B_{ijkt} + \sum_{a=1}^A g_{(Al_2O_3)at} Y_{at} \right]} \leq \max G_c, \forall t = 1, 2, \dots, T,$$

$$+ \left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{(Fe_2O_3)ijk} X_{ijkt} B_{ijkt} + \sum_{a=1}^A g_{(Fe_2O_3)at} Y_{at} \right] \quad (17)$$



$$\min G_c \leq \frac{\left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{(Al_2O_3)ijk} X_{ijk} B_{ijk} + \sum_a^A g_{(Al_2O_3)at} Y_{at} \right]}{\left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{(Fe_2O_3)ijk} X_{ijk} B_{ijk} + \sum_a^A g_{(Fe_2O_3)at} Y_{at} \right]} \leq \max G_c, \forall t = 1, 2, \dots, T, \quad (18)$$

$$\min G_c \leq \frac{\left[\begin{aligned} &4,071 \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{(CaO)ijk} X_{ijk} B_{ijk} + \sum_a^A g_{(CaO)at} Y_{at} \right] \\ &-7,600 \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{(SiO_2)ijk} X_{ijk} B_{ijk} + \sum_a^A g_{(SiO_2)at} Y_{at} \right] \\ &-6,718 \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{(Al_2O_3)ijk} X_{ijk} B_{ijk} + \sum_a^A g_{(Al_2O_3)at} Y_{at} \right] \\ &-1,430 \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{(Fe_2O_3)ijk} X_{ijk} B_{ijk} + \sum_a^A g_{(Fe_2O_3)at} Y_{at} \right] \end{aligned} \right]}{\left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K X_{ijk} B_{ijk} + \sum_a^A Y_{at} \right]} \leq \max G_c, \forall t = 1, 2, \dots, T, \quad (19)$$

$$\min G_c \leq \frac{\left[\begin{aligned} &2,650 \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{(Al_2O_3)ijk} X_{ijk} B_{ijk} + \sum_a^A g_{(Al_2O_3)at} Y_{at} \right] \\ &-1,692 \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{(Fe_2O_3)ijk} X_{ijk} B_{ijk} + \sum_a^A g_{(Fe_2O_3)at} Y_{at} \right] \end{aligned} \right]}{\left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K X_{ijk} B_{ijk} + \sum_a^A Y_{at} \right]} \leq \max G_c, \forall t = 1, 2, \dots, T, \quad (20)$$

$$\min G_c \leq \frac{\left[\begin{aligned} &-3,071 \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{(CaO)ijk} X_{ijk} B_{ijk} + \sum_a^A g_{(CaO)at} Y_{at} \right] \\ &+8,600 \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{(SiO_2)ijk} X_{ijk} B_{ijk} + \sum_a^A g_{(SiO_2)at} Y_{at} \right] \\ &+5,068 \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{(Al_2O_3)ijk} X_{ijk} B_{ijk} + \sum_a^A g_{(Al_2O_3)at} Y_{at} \right] \\ &-1,079 \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{(Fe_2O_3)ijk} X_{ijk} B_{ijk} + \sum_a^A g_{(Fe_2O_3)at} Y_{at} \right] \end{aligned} \right]}{\left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K X_{ijk} B_{ijk} + \sum_a^A Y_{at} \right]} \leq \max G_c, \forall t = 1, 2, \dots, T, \quad (21)$$

$$\min G_c \leq \frac{\left[3,043 \left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K g_{(Fe_2O_3)ijk} X_{ijk} B_{ijk} + \sum_a^A g_{(Fe_2O_3)at} Y_{at} \right] \right]}{\left[\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K X_{ijk} B_{ijk} + \sum_a^A Y_{at} \right]} \leq \max G_c, \forall t = 1, 2, \dots, T, \quad (22)$$

$$X_{ijk} \in \{0,1\}, \forall i=1,2,\dots,I; \forall j=1,2,\dots,J; \forall k=1,2,\dots,K; \forall t=1,2,\dots,T, \quad (23)$$

$$Y_{at} \geq 0, \forall a=1,2,\dots,A; \forall t=1,2,\dots,T; \quad (24)$$

Bảng 1: Những thống kê cơ bản của phân phối hàm lượng trong mô hình khối của mỏ đá vôi

Thuộc tính	Giá trị trung bình	Trung vị	Độ lệch chuẩn	Phương sai	Hệ số biến thiên	Độ lệch	Độ nhọn
Al ₂ O ₃	12.39	12.48	3,54	12,53	0.28	0.31	4.70
Fe ₂ O ₃	24.33	21.81	17,71	313,64	0.73	0.30	1.70
SiO ₂	44.25	38.36	20,95	438,90	0.47	0.69	2.42
CaO	45.19	49.21	11,32	128,14	0.25	-2.28	7.86
MgO	1.88	1.66	0,88	0,77	0.49	1.17	3.95
LOI	37.29	40.49	7,9	62,41	0.21	-2.48	9.05

Ràng buộc (9) đảm bảo rằng một vi khối chỉ được khai thác trong một lần duy nhất. Các ràng buộc (10) - (12) đảm bảo ràng buộc ưu tiên được thỏa mãn. Mỗi quan hệ ưu tiên được phân tích dọc theo trục y. Ràng buộc (10) xác định số khối được khai thác trên mặt phẳng j chứa vi khối mục tiêu ijk và vuông góc với trục y. Trong khi đó, các ràng buộc (11) và (12) xác định số vi khối được khai thác trên các mặt phẳng vuông góc với trục y, ở phía sau và phía trước của mặt phẳng j, tương ứng. Công suất khai thác tối đa và tối thiểu được thể hiện trong ràng buộc (13). Ràng buộc (14) đảm bảo rằng khối lượng phụ gia được mua trong giai đoạn t nằm trong giới hạn chấp nhận được. Ràng buộc (15) đảm bảo rằng sau khi phối trộn các giá trị phần trăm của các thành phần hóa CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, LOI, K₂O, Na₂O đạt yêu cầu sản xuất xi măng. Ràng buộc (16) - (22) đảm bảo thỏa mãn giới hạn trên và dưới cho các giá trị LS, SR, IM, C₂S, C₃S, C₃A, LSF. Cuối cùng, các ràng buộc (23) - (24) xác định các loại biến quyết định.

2.4. Phương pháp giải

Trong cách giải quyết mô hình tuyến tính số nguyên hỗn hợp được đề xuất trong phần trước, sản lượng mỏ được xác định theo ràng buộc (13), thể hiện những thuộc tính chung của bài toán xếp balo (bài toán Knapsack). Đây là một bài toán NP-hard (là một tập hợp các bài toán trong lý thuyết độ phức tạp tính toán), điều đó có nghĩa giải pháp tối ưu của vấn đề lập kế hoạch khai thác dài hạn cho các mỏ đá vôi xi măng không thể có được trong thời gian tính toán thực. Do đó, để giải quyết vấn đề này nhóm nghiên cứu đã áp dụng các phương pháp khử biến và phương pháp Heuristics nhằm giảm thời gian giải quyết và thu được các giải pháp cận tối ưu cho vấn đề lập kế hoạch khai thác dài hạn cho các mỏ đá vôi xi măng.

2.5. Áp dụng mô hình cho mỏ đá vôi Tà Thiết - Bình Phước

Mô hình tuyến tính số nguyên hỗn hợp được triển khai áp dụng tại mỏ đá vôi xi măng Tà Thiết – Bình Phước cung cấp nguyên liệu thô cho nhà máy xi măng Bình Phước. Khu vực nghiên cứu có đặc điểm có độ dốc nhẹ từ Tây sang Đông. Các thành tạo đá chính gặp phải trong khu vực bao gồm đá mácnơ có hàm lượng thấp, đá vôi có hàm lượng cận hàm lượng biên và đá vôi có hàm lượng cao. Đá mácnơ có hàm lượng Cao thấp (CaO <36%) và đá vôi có hàm lượng cận hàm lượng biên (36%≤CaO≤40%) không thể được sử dụng để sản xuất xi măng và được đổ vào bãi thải, dẫn đến tăng chi phí khai thác và tổn thất tài nguyên. Hiện tại, công ty đang sử dụng phần mềm Surpac để xây dựng mô hình khối với 20000 vi khối với kích thước mỗi vi khối là 15×15×10m. Bảng 1 trình bày những đặc trưng thống kê trong mô hình khối của thân khoáng sàng.

Bảng 2. Các ràng buộc khi lập kế hoạch khai thác dài hạn mỏ đá vôi xi măng

Hạn mức	Tối thiểu	Tối đa
Công suất mỏ (triệu tấn)	5	6
Khối lượng phụ gia (triệu tấn)	0	1
CaO (%)	62	69
SiO ₂ (%)	17	26
Al ₂ O ₃ (%)	4	10
Fe ₂ O ₃ (%)	0.1	5
MgO, Na ₂ O, K ₂ O (%)	0	5
SR	2	2.6
LSF	0.9	1
AM	1	3
C ₂ S (%)	40	60
C ₃ A (%)	5	15
C ₄ AF (%)	10	18

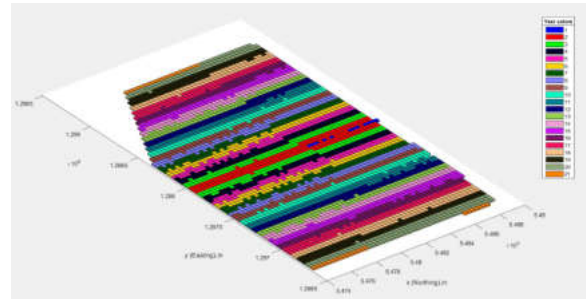
Bảng 3 Giải pháp tối ưu đã giảm thiểu tổng chi phí tạo ra hỗn hợp nguyên liệu thô cho 21 giai đoạn lập kế hoạch và đáp ứng tất cả các yêu cầu về số lượng và chất lượng của các thành phần hóa

Giai đoạn lập kế hoạch	Số lượng vi khối	Chi phí, \$	Giai đoạn lập kế hoạch	Số lượng vi khối	Chi phí, \$
1	800	13592233,21	12	1000	332403205,5
2	1000	38581877,03	13	1000	363618337,9
3	1000	67231072,68	14	1000	394793795
4	1000	96578361,28	15	1000	426746165,9
5	1000	125882771,1	16	1000	459202959,3
6	1000	154864557,3	17	1000	492358947,7
7	1000	184140634,3	18	1000	526440175,1
8	1000	212913383,5	19	1000	561628861,8
9	1000	241924199,4	20	1000	597088262,6
10	1000	271806748,8	21	200	123815283
11	1000	302169296,1			

Để sản xuất xi măng, nhà máy xi măng Bình Phước sử dụng đất sét, cát, đá vôi chất lượng cao và quặng sắt được mua từ các nhà cung cấp khác nhau làm phụ gia để pha trộn với các nguyên liệu thô từ mỏ đá nhằm đạt được các yêu cầu về chất lượng và số lượng cần thiết theo công nghệ sản xuất xi măng.

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 tuyến tính số nguyên hỗn hợp. Bộ giải bắt đầu với việc giải một mô hình tuyến tính nói lỏng, trong đó các biến số nguyên được nói lỏng thành các biến số thực. Sau đó, bộ giải đã sử dụng thuật toán phân nhánh và giới hạn để tìm kiếm giải pháp khả thi số nguyên. 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 cầu ràng buộc đối với vấn đề lập kế hoạch khai thác dài hạn mỏ đá vôi xi măng được tóm tắt trong Bảng 2.

Giải pháp kế hoạch khai thác tối ưu đã giảm thiểu tổng chi phí để tạo ra hỗn hợp nguyên liệu thô cho 21 năm là 5987781128,50 \$ và đáp ứng tất cả các ràng buộc về số lượng và chất lượng của các thành phần hóa. Chi phí cung cấp nguyên liệu thô riêng lẻ trong 21 năm được trình bày trong Bảng 3. Kế hoạch khai thác đảm bảo cung cấp tối thiểu 200 vi khối và tối đa 1000 khối hỗn hợp nguyên liệu thô cho nhà máy xi măng trong mỗi giai đoạn lập kế hoạch.



H1. Bình đồ kế hoạch khai thác mỏ đá vôi Tà Thiết

3. KẾT LUẬN

Đá vôi là nguyên liệu chính để sản xuất xi măng, nhưng việc lựa chọn loại đá vôi phải thỏa chất lượng và số lượng các oxit như Cao, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃. Sự tồn tại của một nhà máy xi măng phụ thuộc rất nhiều vào sự trung hòa chính xác của nguồn nguyên liệu thô để tạo ra sản phẩm cuối cùng có chất lượng chấp nhận được.

Kỹ thuật tối ưu hóa lịch kế hoạch khai thác chưa được áp dụng rộng rãi trong khai thác mỏ đá vôi để sản xuất xi măng. Gần đây, mô hình tuyến tính số nguyên hỗn hợp đã được sử dụng hiệu quả để giải quyết các vấn đề lập kế hoạch khai thác mỏ. Nghiên cứu này phát triển một mô hình tuyến tính số nguyên hỗn hợp mới tích hợp tối ưu hóa kế hoạch khai thác dài hạn cho các mỏ đá vôi xi măng để cung cấp nguyên liệu thô bền vững cho sản xuất xi măng với chi phí tối thiểu. Kết quả nghiên cứu này có thể hỗ trợ cho các kỹ sư mỏ dễ dàng hơn trong việc lập kế hoạch khai thác các mỏ đá vôi làm nguyên liệu để sản xuất xi măng.

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; 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.

Mô hình tác giả phát triển đã được chứng minh và đánh giá thực tế khi áp dụng tại mỏ đá vôi Tà Thiết – Bình Phước và tạo ra được kế hoạch khai thác mỏ phù hợp với điều kiện thực tế tại mỏ, điều này nhấn mạnh tầm quan trọng của việc áp dụng các kỹ thuật tối ưu hóa trong việc giải quyết vấn đề lập kế hoạch khai thác dài hạn cho các mỏ đá vôi để sản xuất xi măng. □

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Asad, M.W.A., (2008). Multi-period quarry production planning through sequencing techniques and sequencing algorithm. *Journal of Mining Science*, 44 (2),206–217.
2. Asad, Mohammad Waqar Ali.,(2011) “A heuristic approach to long-range production planning of cement quarry operations.” *Production Planning & Control* 22.4: 353-364.
3. Askari-Nasab, H., Awuah-Offei, K., & Eivazy, H. (2010). Large-scale open pit production scheduling using mixed integer linear programming. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, 2, 185–214.
4. Bley, A., Boland, N., Fricke, C., & Froyland, G. (2010). A strengthened formulation and cutting planes for the open pit mine production scheduling problem. *Computers & Operations Research*, 37(9), 1641–1647.
5. Srinivasan, S. and Whittle, W., (1996). Combined pit and blend optimization. Society of Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. Annual Meeting, Phoenix, AZ.
6. Tolwinski, B., (1998) Scheduling production for open pit mines, in *Proceedings of APCOM'98*, , pp. 19–23.
7. Whittle, J., (1989), *The Facts and Fallacies of Open Pit Optimization*, 1989 (Whittle Programming Pty Ltd: North Balwyn, Victoria).

OPTIMIZATION OF LONG-TERM CEMENT QUARRY PRODUCTION SCHEDULE USING MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMMING

ABSTRACT

Production scheduling optimization techniques have not become common in cement quarry mining. This research sought to present and implement a new optimization model based on Mixed Integer Linear Programming (MILP) along with an efficient solution method to address the long-term cement quarry production scheduling problem. A multi-step method was applied to solve the long-term cement quarry production scheduling problem (LCQPSP) and finding a starting integer feasible solution (SIFS). The implementation of the model and the solution method at a cement quarry shows their ability to generate practical schedules in a reasonable time.

Keywords: *cement quarry, raw mix, long-term cement quarry production scheduling, Mixed Integer Linear Programming, block, optimization*

Ngày nhận bài: 12/01/2021;
Ngày gửi phản biện: 15/01/2021;
Ngày nhận phản biện: 19/02/2021
Ngày chấp nhận đăng: 30/3/2021.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm Tác giả xin chân thành cảm ơn Trường Đại học Mỏ-Địa chất đã tài trợ nhóm nghiên cứu trong đề tài mã số T20-16,2020.