

Một số vấn đề môi trường cần lưu ý khi khai thác và tinh chế Nickel

Vương Quân Hoàng, Nguyễn Minh Hoàng, Lã Việt Phương

HN 15-10-2023

* * * * *

Trong bài viết này chúng tôi trình bày thông tin đại cương về vai trò của nickel trong công nghiệp chế tạo giữa bối cảnh yêu cầu bảo vệ môi sinh trong đại nghị sự mục tiêu phát triển bền vững (SDG) của Liên Hợp Quốc ngày một cấp bách, đối diện với nguy cơ không thể hoàn thành. Các thông tin tóm lược ở đây được dẫn chiếu tới một số nhỏ các tài liệu tham khảo chính và không thể đảm bảo tính trọn vẹn trong khuôn khổ một bài báo nhỏ. Những vấn đề đặt ra có tính tổng quát cho quan hệ môi sinh với việc khai khoáng, tách và tinh chế nickel nói chung trên thế giới. Vì thế, có thể thông tin trong bài không hoàn toàn trùng khớp với tình hình cụ thể của một địa phương trên trái đất, do đặc điểm địa lý, địa chất và kinh tế-công nghệ khác biệt. Bài viết tập trung xoay quanh nguyên lý quan hệ kinh tế-môi trường và ý nghĩa thực tiễn của cụm từ “bền vững” trong bối cảnh cụ thể của công nghiệp nickel.

□

Nickel là một kim loại màu trắng bạc, ký hiệu hóa học Ni, số nguyên tử 28. Bề mặt bóng, khối lượng riêng xấp xỉ đồng, nickel là kim loại có hình thức đẹp và nặng. Nickel nằm trong nhóm 5 nguyên tố sắt từ, bao gồm Sắt (Fe), Cobalt (Co), Nickel (Ni), Gadolini (Gd), Dysprosi (Dy). Do đặc tính cơ học cứng, có khả năng dát mỏng, dễ uốn, dễ kéo sợi mảnh, khá tương tự với vàng, nickel có rất nhiều công dụng trong công nghiệp chế tạo sử dụng kim loại. Nhiệt độ nóng chảy của nickel là 1455 °C.

Trong điều kiện bình thường nickel không bị ôxy hóa, do đó người ta sử dụng nickel phổ biến để đúc tiền, sản xuất thép không rỉ, chế tạo chi tiết động cơ có độ bền và hiệu suất cải thiện [1], các linh kiện cần độ tin cậy cao. Khoảng 65% lượng sản nickel sản xuất ra dùng trong công nghiệp luyện kim thép không rỉ, 11% cho siêu hợp kim với các tính chất lý hóa khó tính như chống ăn mòn, trong các điều kiện đặc biệt. Một tỷ trọng đáng kể nữa của ứng dụng nickel là chế tạo nam châm (AlNiCo), vật liệu từ mềm (NiFe Permalloy), điện cực...

Với môi trường, nickel được kỳ vọng là một trong số ít kim loại có thể xoay chuyển cuộc chơi do chiếm tỷ trọng lớn và vai trò quan trọng trong sản xuất pin sạc sử dụng nhiều lần, vốn đang là trọng tâm cuộc chiến giữa các hãng xe hơi điện (EV). Có thể nói, mặc dù đã được con người khai thác và sử dụng khoảng 3500 năm, chưa bao giờ vai trò nickel lại đạt tới mức đỉnh cao của sự chú ý và ham muốn khai thác như giai đoạn hiện nay.

Nickel trong vai trò hàng hóa nguyên liệu chế tạo

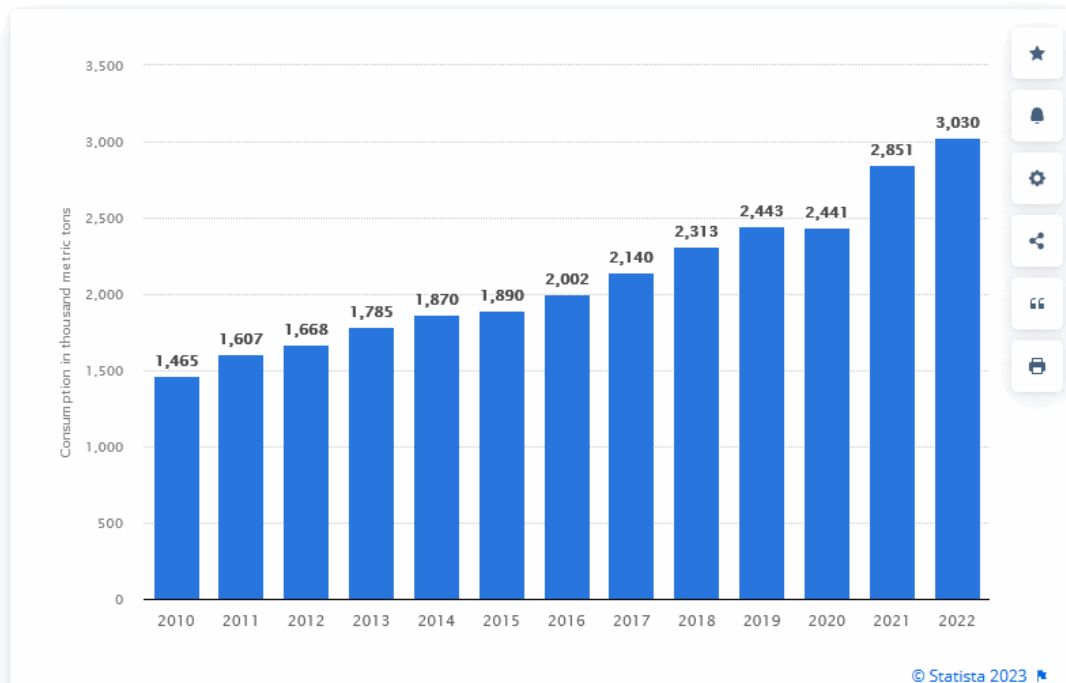
Nickel thu được từ khai mỏ, chủ yếu là quặng laterite, với thành phần chính chứa nickel là limonite $(Fe,Ni)O(OH)$ và garnierite (nickel silicat ngậm nước $(Ni,Mg)_3Si_2O_5(OH)$). Một loại quặng quan trọng nữa cho tỷ trọng nickel khả dĩ là sulfide magma, có thành phần chính là pentlandite $(Ni,Fe)_9S_8$.

Các quặng chứa oxide hay hydroxide được tách bằng phương pháp thủy luyện, và quặng giàu sulfide tách bằng phương pháp nhiệt luyện hoặc thủy luyện. Quặng giàu sulfide được sản xuất bằng cách áp dụng quy trình tuyển quặng. Theo dữ liệu chung, thì nhà sản xuất nickel công nghiệp chủ yếu của thế giới là Nga với sản lượng đạt khoảng hơn 260.000 tấn/năm. Kế đến là Úc và Canada, lần lượt khoảng 200.000 và 130.000 tấn/năm. (Xin lưu ý các số liệu về sản lượng này chỉ là làm tròn và có tính chính xác tương đối.)

Tầm quan trọng đang gia tăng trong công nghiệp sản xuất pin cho xe điện khiến nickel trong vai trò hàng hóa nguyên liệu trở nên hấp dẫn hơn bao giờ hết. Năm 2022, thế giới sản xuất ra 3.03 triệu tấn nickel nguyên liệu, trong một chuỗi tăng cung nickel liên tục suốt từ năm 2010 [2]. Thế nhưng, thực tế cũng chỉ khoảng dưới 15% tổng số nguyên liệu nickel sản xuất ra hàng năm phục vụ cho sản xuất pin theo năm có tỷ trọng cao nhất (năm 2022 có 450.000 tấn nickel sử dụng cho pin, trên tổng số 3,03 triệu tấn tiêu thụ).

Consumption volume of nickel worldwide from 2010 to 2022

(in 1,000 metric tons)



Mức tiêu thụ nickel của thế giới, 2010-2022 (nguồn: Statista [2])

Ba nước có trữ lượng nickel lớn nhất thế giới theo U.S. Geological Survey là Indonesia (22%), Úc (22%), và Brazil (17%) [3]. Tổng trữ lượng nickel đã thăm dò và ước tính được theo IEA vào khoảng 95-100 triệu tấn.

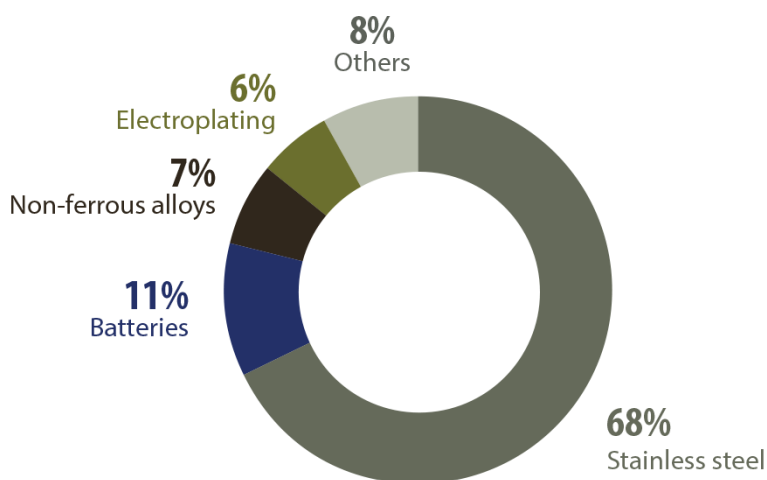
Mức tiêu thụ lớn cộng với giá hàng hóa cao, đã biến nickel trở thành thứ nguyên liệu có quy mô thị trường toàn cầu đạt tới mức rất lớn: 90-100 tỷ USD.

Lời hứa bền vững môi trường và bóng dáng của Ni

Không phải vô cớ mà liên hệ nickel với mục tiêu phát triển bền vững SDG. Đó là vì ứng dụng trong chế tạo các máy móc công nghiệp mà con người cho rằng phù hợp với phát triển bền vững như pin sạc, chi tiết tuốc-bin gió, tế bào quang điện pin mặt trời, cấu kiện nhà máy năng lượng sinh học, thiết bị thu giữ trữ carbon, nhà máy điện hạt nhân, các công trình xây dựng hiện đại tính đến yếu tố bền vững môi trường, v.v..

Đặc biệt với nghị sự chuyển đổi sang xe điện, nỗ lực từ bỏ động cơ sử dụng nhiên liệu hóa thạch, hai loại pin sạc sử dụng nickel phổ biến nhất là Nickel Cobalt Aluminium (NCA) và Nickel Manganese Cobalt (NMC) có tỷ trọng sử dụng nickel lên tới mức cao lần lượt là 80% và 33%, cùng với một số công thức hỗn hợp mới đang thử nghiệm đều hướng tới mức sử dụng 80% nickel [4].

Hình dưới đây cung cấp sơ bộ tỷ trọng sử dụng nickel hiện nay, với số liệu mang tính tương đối, do IEA công bố.



Sử dụng nickel toàn cầu, thống kê năm 2021 (nguồn: Chính Phủ Canada [3])

Những công nghệ hứa hẹn bền vững kể trên đã đặt nickel vào vị trí của kim loại có tầm quan trọng hàng đầu giữa kỷ nguyên biến đổi khí hậu. Các chính phủ và lãnh đạo ngành công nghiệp lớn, quan trọng cũng sớm đưa tài trong chiếm lĩnh thị trường, khai thác, chế biến/tinh luyện nickel, cũng như chế tạo sản phẩm ứng dụng nickel. Tuy nhiên, chúng ta đều biết mọi lời hứa thuộc về tương lai, còn các cân nhắc, hành động và thực tế tác động lên môi trường đã hoặc đang xảy ra. Vậy điều gì đang xảy ra với nickel.

Tình huống Ni và hệ giá trị bất đối xứng

Tình huống mới nhất khiến thế giới chú ý là các dự án khai mỏ nickel ở Indonesia. Indonesia cùng với Australia hiện vẫn là hai quốc gia dẫn đầu về trữ lượng nickel [5]. Tuy nhiên, dữ liệu US Geological Survey cho thấy năm 2022, riêng Indonesia cung cấp gần 50% quặng nickel cho nền kinh tế thế giới. Tất nhiên, khai thác, chế biến, tách, tinh luyện nickel có cái giá của nó. Và bất đối xứng đầu tiên là giá trị môi trường bị hy sinh trước tiên, ở quy mô lớn. Các dự án này đã chặt phá rừng quy mô rất lớn, và đây lại là những diện tích rừng có mức độ đa dạng sinh học cao bậc nhất thế giới, đồng nghĩa với việc trực tiếp gây rối loạn và đảo lộn cân bằng sinh thái một khu vực rộng lớn.

Các dự án này đều được hậu thuẫn bởi các hãng xe đang hướng tới lời hứa xe điện—lời hứa tương lai về giải pháp giảm phát thải khí nhà kính—và đều được triển khai rất khẩn trương. Họ đều là các tên tuổi lớn: Ford (Hoa Kỳ), Vale (Brazil), Tsingshan (Trung Quốc), Jardine Matheson (Hong Kông).

Dữ liệu đã công bố cho biết, ít nhất hơn 76.300 hectare rừng nhiệt đới — tương đương diện tích của New York — đã bị chặt phá trong số 329 khu đất nhượng quyền. Trong số này, khoảng 23.000 hectare đã bắt đầu bị chặt hạ từ 2019, khi nhu cầu xe điện và pin sạc nickel bắt đầu tăng mạnh [6].

Khi các phóng viên điều tra của FT cố gắng liên lạc với đại diện các chủ đầu tư, các liên doanh của các hãng xe hơi lớn, thì đều không có tín hiệu phản hồi [6].

Về lý thuyết, các hãng đều có cam kết về trồng lại rừng, tuy nhiên thực tế phức tạp hơn vậy nhiều lần. Những loại đất có trữ lượng quặng laterite cao đều cứng, và rừng nguyên sinh cần nhiều thập niên, thậm chí cả thế kỷ để có thể phát triển, và trở thành khu vực thu giữ carbon (carbon sink). Việc gây rối loạn hệ cân bằng trước tiên đã trực tiếp gây phát thải từ đất, nhưng về lâu dài, cây có thể mọc lại không là câu hỏi lớn. Chưa kể, cần 4-5 thập niên để khả năng thu giữ và trữ carbon đạt tới mức hiệu quả.

Bên cạnh đó, việc khai thác nickel còn tốn nước nữa chứ. Dữ liệu của IEA cho biết, vào năm 2021, mỗi kilogram Ni khai thác tiêu tốn trung bình 0,053 m³ nước, tương đương Cobalt (0,057 m³/kg) [7].

Mặc dù tính chính xác lượng nước cần sử dụng để khai mỏ nickel khá phức tạp, do tùy thuộc vào loại quặng, địa hình, công nghệ chế biến, tuy nhiên nếu giả sử mức khai khoáng quặng laterite năm 2022 vào khoảng 2,2 triệu tấn, thì lượng nước tiêu thụ cũng rơi vào mức gần 1 triệu m³. Còn lượng nước để tinh luyện nickel năm 2022, rơi vào khoảng 530.000 m³. Đây đều là những con số tài nguyên khổng lồ [8].

Việc tách và tinh luyện Ni còn tốn rất nhiều điện năng. Do đó, các nhà nghiên cứu không thể bỏ qua nguồn năng lượng sử dụng để sản xuất nickel thương phẩm, vì nguồn năng lượng này cũng trực tiếp liên quan tới phát thải khí nhà kính. Ví dụ cụ thể, mức năng lượng tiêu tốn cho sản xuất kim loại nickel thành phẩm là 174 GJ/t, tức quy đổi khoảng 48,3 ngàn kWh; hay là ferronickel loại phẩm cấp thấp nhất cũng tiêu tốn 60 GJ/t, tức khoảng 16,7 ngàn kWh điện năng cho 1 tấn sản phẩm [9]. Chính vì thế, số liệu công nghiệp xe điện cho biết để sản xuất một bộ pin lithium-ion 80 kWh của xe điện Tesla Model 3, ngành công nghiệp chế tạo luyện kim sẽ xả thải trong khoảng từ 2,5 đến 16 tấn CO₂ [10].

Đối với tác động môi trường, một yếu tố vừa phát thải vừa tác động lâu dài môi sinh các hệ động thực vật bản địa là bùn quặng đuôi. Đây là vấn đề nhức nhối, thường xuyên gây ra tranh chấp pháp lý, cũng như để lại hậu quả kinh tế-xã hội lâu dài. Các quy định pháp lý với xử lý loại chất thải gồm cả rắn và lỏng này cũng khác biệt và khó chặt chẽ. Riêng với bùn quặng đuôi trong khai thác nickel cũng có vấn đề lịch sử lâu dài, tạo ra nhiều thách thức, do nickel là kim loại nặng có tác động môi trường lâu dài. Khi bùn quặng đuôi tiếp xúc với không khí lâu ngày, các phản ứng hóa học tiếp diễn với oxy sẽ phát sinh các loại acid độc hại đối với hầu hết các loại sinh vật sống. Các loại bùn đuôi khi bỏ vào các hồ chứa hay các bãi chôn lấp, thường khi gặp nước mưa sẽ ngấm, tràn, chảy... đưa các thành phần kim loại nặng ngấm tràn lan sẽ là hiểm họa lâu dài với cả đất canh tác, nguồn nước ngầm. Việc xử lý thường có tính chất đối phó, do xử lý triệt để sẽ gây tốn kém rất lớn, và doanh nghiệp nhiều nơi thà chịu phạt trong hoạt động khai khoáng còn có lợi ích kinh tế cao hơn là xây dựng các phương án xử lý triệt để từ ban đầu [11].

Ở Việt Nam ta đã từng có rất nhiều tranh luận và nghị luận chính sách có liên quan tới bùn quặng đuôi của các dự án bauxite từ trước khi bắt đầu khai thác. Tuy nhiên, nếu so với nickel, hiện nay công nghệ xử lý bùn quặng đuôi khai khoáng bauxite đã tiến triển tích theo hướng giảm footprint và tăng an toàn, với phương pháp "Tailings Dry Backfill" trả phần chất thải trở về vị trí mỏ đã mở và tiến hành thu hồi, làm khô, hoàn trả và tái trồng rừng. Có một số ý kiến cho rằng, công nghệ hoàn nguyên với khai thác quặng nickel sẽ phức tạp và tốn kém hơn bauxite [12].

Hệ giá trị của hàng hóa và môi sinh rõ ràng có những khác biệt mà những nguyên nhân thực tế phía sau sự khác biệt đó không thể bỏ qua, bởi vì chúng sẽ quyết định cái mà con người mong muốn: bền vững. Đó là lý do phần tiếp theo sẽ áp dụng "nguyên lý bán dẫn giá trị kinh tế-môi trường" để làm rõ và đẩy các lập luận tới sát mức độ quen thuộc của giao dịch thương mại [13].

Kinh doanh, lợi nhuận và vấn đề tính toán thời điểm (timing)

Xuyên suốt các lập luận và trình bày dữ liệu ở các phần trên, bài viết đang làm rõ dần một thực tế rằng lời hứa về việc sử dụng tài nguyên nickel cho mục tiêu bền vững môi sinh có nhiều điểm vừa bất trắc, vừa mâu thuẫn.

Thứ nhất, trước khi có thể thực hiện bất kỳ hoạt động nào đóng góp tài chính hay công sức cho gây dựng hệ sinh thái, việc phá hủy sẽ được tiến hành trước. Trong trường hợp của Indonesia là hàng chục ngàn hectare rừng nhiệt đới có hệ sinh thái lâu đời, đa dạng, phong phú và ở tình trạng cân bằng.

Thứ hai, việc hạn chế xả thải CO₂, cũng như các khí nhà kính khác, là lời hứa tương lai, trong khi đó, như dữ liệu đã có chỉ ra, chỉ việc gây mất cân bằng sinh thái rừng đã làm tăng CO₂ khí quyển. Kèm thêm xả thải do sử dụng điện, khai thác nước, vận chuyển, v.v.. trong quá trình khai quặng, tách và tinh luyện. Trong khi đó, lượng Ni thực tế để sử dụng trong thập kỷ gần đây khi nhu cầu pin xe điện tăng cao cũng chỉ dao động trong mức 10-15% tổng cầu nickel.

Thứ ba, tính khả thi của những lời hứa về môi trường nhờ vai trò mới của nickel biến thiên theo: a) Thời gian rất dài; b) Rủi ro thị trường mà các doanh nghiệp khai khoáng cũng như trực tiếp sử dụng nickel phải đối diện; c) Tình trạng tài chính mà các dự án khai khoáng cũng như chế tạo sử dụng nickel đạt đến trong tương lai.

Nói tổng quát, do chủ thể sử dụng tài nguyên là doanh nghiệp, việc thực hiện tới đâu các lời hứa đảm bảo giá trị sinh thái-môi trường, phụ thuộc rất lớn vào tình hình kinh doanh của họ. Khi này, các khuôn khổ pháp lý khi khởi sinh dự án không thể đủ chi tiết để điều chỉnh tất cả các tình huống phát sinh. Phương trình lợi nhuận của doanh nghiệp rất phức tạp, và luôn phải đối diện với những biến động địa chính trị, địa kinh tế không thể tính hết. Lợi ích nằm trong phương trình cân bằng giá trị kinh tế với tổn thất sinh thái, hay mãi là bất phương trình mà phần lợi thuộc về doanh nghiệp, là thứ câu hỏi chỉ có thể có đáp án sau hàng thập kỷ. Rốt cục thì môi trường ở đâu trong bức tranh tổng thể khó mà cam kết. Chỉ biết rằng, một khi những cánh rừng hàng chục ngàn hectare đã chặt, thì ưu tiên sẽ là bóc đất đá, khai khoáng, tuyển quặng, tách, tinh luyện, vận chuyển, v.v.. trước khi nói tới chuyện tái dựng môi sinh của khu vực khai khoáng.

Bây giờ, ta sẽ xét thử một tình huống cho thấy rủi ro tài chính sẽ dẫn tới rủi ro môi trường. Trước tiên là đồ thị giá nickel quốc tế.

Những khoảng biến thiên lớn luôn đi kèm cả lợi nhuận và rủi ro cho doanh nghiệp sản xuất nickel. Trong đồ thị, giá đã từng đạt tới mức đỉnh điểm 48.560 USD/tấn vào ngày 7-3-2022, nửa tháng sau khi bùng phát xung đột vũ trang giữa Nga-Ukraine. Nhưng 9 tháng sau, giá nickel rớt xuống mức 31.280 USD/tấn (7-12-2022), mất ~55% giá trị. Tuy nhiên, dữ liệu cho thấy một đáy mới về giá hàng hóa nguyên liệu nickel được tạm thiết lập vào ngày 11-10-2023 vừa qua, ở mức chỉ còn 18.080 USD/tấn, tức chỉ còn 37% giá trị so với lúc đỉnh điểm.



Diễn biến giá nickel và dự báo (nguồn: Trading Economics [14])

Giả sử nếu doanh nghiệp tính toán mọi giá trị đầu tư, phục hồi sinh thái, cam kết nghĩa vụ, ở mức giá đỉnh cao, thì khi giá chỉ còn 1/3, hoạt động đầu tư sẽ ưu tiên gì? Câu trả lời chắc chắn là: Sự tồn tại của doanh nghiệp, thay vì sự phục dựng giá trị sinh thái (đã tiêu vong). Nếu giá xuống thấp không đảm bảo bù đắp chi phí, doanh nghiệp sẽ có một lựa chọn mà cả cổ đông lẫn chính phủ nước sở tại (nơi có nguồn tài nguyên) không mong muốn: dừng sản xuất để bảo toàn vốn. Khả năng này đã hiện thực hóa với một kim loại khác cũng rất quan trọng với sản xuất công nghiệp là kẽm. Hôm 12-9-2023, Reuters đưa tin cho biết Almina-Minas do Alentejo (của Bồ Đào Nha) sẽ dừng sản xuất kẽm và chèn tại cơ sở khai khoáng Aljustrel kể từ 24-9 cho tới quý 2 năm 2025 vì giá kẽm xuống quá sâu. Giá kẽm trên thị trường giao dịch kim loại London LME giảm ~30% kể từ tháng 1-2023 xuống mức 2500 USD/tấn cuối tháng 9 [15].

Rõ ràng, khi đã dừng sản xuất thì những lời hứa "xử lý vấn đề môi trường" sẽ được thực hiện với mức ưu tiên rất thấp cả về tài chính lẫn thời gian, vì việc dừng là do lỗ và không đủ dòng tiền.

Quay lại đồ thị ở trên, đường thẳng cuối diễn biến giá thực tế là dự báo giá nickel đi xuống "một cách ổn định". Điều này khiến rủi ro môi trường trở nên gần sự thật hơn. Bên cạnh đó, nó tạo ra cảm giác đánh lừa của hiệu ứng giá xuống: hình như thế giới đang dư cung nickel, trong khi thực tế hoàn toàn trái ngược, tổng trữ lượng nickel đã được ghi nhận qua thăm dò chỉ dưới 100 triệu tấn mà thôi. Rõ ràng, biến thiên giá thị trường đã gián tiếp làm giảm giá trị của những cam kết môi trường được kỳ vọng hiện thực hóa qua dòng tiền của doanh nghiệp.

Ngay cả khi lập luận rằng việc “phá” hay “xây” đối với môi sinh chỉ là chuyện “tạm thời”, thì cái giá phải trả cũng rất lớn. Thông tin nghiên cứu mới cho biết thậm chí nhiệt độ nóng lên 2°C dù chỉ tạm thời cũng sẽ tác động tiêu cực tới nước biển với hậu quả còn đo được sau hàng thế kỷ nữa, do mức ô xy trong nước biển sẽ giảm xuống, dẫn tới co hẹp lại các vùng sinh thái có thể sống được của rất nhiều loài sinh vật biển, trong một thời gian rất lâu dài sau khi mức CO₂ tăng lên tới đỉnh rồi giảm đi [16].

Rừng là thứ tài nguyên có thể bị tàn phá cực nhanh, như chúng tôi hay nói (đùa không vui lắm) với nhau: Cây đứng yên cho người chặt, hiên ngang, không né tránh. Gần nhất minh họa cho thực tế này là số liệu của Bolivia gây bàng hoàng, với tốc độ phá rừng năm 2022 tăng tới 32% so với năm 2021. Tỷ lệ này góp phần trao cho Bolivia huy chương đồng về phá rừng, chỉ chịu thua Brazil và Congo [17]. Tuy nhiên, cái thua này cũng hơi oan ức, vì nếu quy đổi theo tỷ lệ so với dân số quốc gia, do Brazil cực kỳ rộng lớn và có dân số cao hơn nhiều lần, tỷ lệ phá rừng thì Bolivia là “đại ca” của Brazil, gấp 4 lần [17]. Họ chặt rừng để trồng đỗ tương. Với tốc độ này, diện tích canh tác đỗ tương tăng nhanh, khiến cho đỗ tương và các sản phẩm chế biến trở thành nguồn thu xuất khẩu lớn thứ 3 của quốc gia, đạt mức 2 tỷ USD. Tuy nhiên, con số doanh thu rất lớn này nếu xét tương quan với mức thiệt hại môi sinh thì sẽ ra sao? Điều này lại không thấy ai trả lời, chỉ biết rừng đã mất thì hàng trăm năm mới may ra có thể phục hồi, và khí hậu thì vẫn đang tiếp tục diễn biến cực đoan hơn, tới mức chính nông dân trồng đỗ tương cũng khó dự báo được năng suất chất lượng vụ mùa sau.

Khi thay chữ “đỗ tương” bằng “nickel” thì cơ bản mọi sự vẫn không có thay đổi gì đáng kể về bản chất. Và câu hỏi “Môi trường ở đâu trong lời giải được cho là để bảo vệ môi trường” của nickel vẫn không thể được giải đáp. Hiện tại, nó chỉ hiện ra rõ nhất trong phương trình lợi nhuận của công nghiệp khai khoáng và chế tạo, và chắc chắn đang là số âm. Đây có phải là do “con người đang ở trong một mối quan hệ độc hại và lạm dụng với thiên nhiên? Tình yêu này thật kỳ lạ” [18].

Chưa bao giờ chữ “thặng dư sinh thái” lại quý giá như bây giờ [13,19].

References

- [1] Bloch, F., Waeckerle, T., & Fraise, H. (2007). The use of iron-nickel and iron-cobalt alloys in electrical engineering, and especially for electrical motors. *2007 Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing Expo*. <https://ieeexplore.ieee.org/document/4562649>
- [2] Statista. (2023). Consumption volume of nickel worldwide from 2010 to 2022. <https://www.statista.com/statistics/273635/consumption-of-nickel-since-2007/>
- [3] Government of Canada. (2023). Nickel facts. <https://natural-resources.canada.ca/our-natural-resources/minerals-mining/minerals-metals-facts/nickel-facts/20519>

- [4] Nickel Institute. (2023). Nickel and the Sustainable Development Goals. <https://nickelinstitute.org/en/sdgs/>
- [5] Olafsdottir, A. H., & Sverdrup, H. U. (2021). Modelling global nickel mining, supply, recycling, stocks-in-use and price under different resources and demand assumptions for 1850–2200. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 38, 819-840. <https://doi.org/10.1007/s42461-020-00370-y>
- [6] Dempsey, H., & Ruehl, M. (2023). Nickel miners linked to devastation of Indonesian forests. <https://www.ft.com/content/cd1fd7f3-b3ea-4603-8024-db75ec6e1843>
- [7] International Energy Agency. (2021, May 5). Indicators for water use for selected minerals. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/indicators-for-water-use-for-selected-minerals>
- [8] Northey, S. A., & Haque, N. (2013). *Life cycle based water footprint of selected metal production*. CSIRO. EP137374. <https://publications.csiro.au/rpr/download?pid=csiro:EP137374&dsid=DS3>
- [9] Wei, W., Samuelsson, P. B., Tilliander, A., Gyllenram, R., & Jönsson, P. G. (2020). Energy consumption and greenhouse gas emissions of nickel products. *Energies*, 13(21), 5664. <https://doi.org/10.3390/en13215664>
- [10] Phương, L. V., & Hoàng, N. M. (2023, Oct. 14). Các thách thức trong quá trình chuyển đổi từ xe nhiên liệu hóa thạch sang xe điện cho mục tiêu phát triển bền vững. <https://kinhtevadubao.vn/cac-thach-thuc-trong-qua-trinh-chuyen-doi-tu-xe-nhien-lieu-hoa-thach-sang-xe-dien-cho-muc-tieu-phat-trien-ben-vung-27328.html>
- [11] Wise, E. M., & Taylor, J. C. (n.d.) Extraction and refining. <https://www.britannica.com/technology/nickel-processing/The-metal-and-its-alloys>
- [12] Advanced Research Projects Agency – Energy. (2022, Oct. 27). CO2 GONE – CO2 gasification of ore for nickel extraction. <https://arpa-e.energy.gov/technologies/projects/co2-gone-co2-gasification-ore-nickel-extraction>
- [13] Vuong, Q. H. (2021). The semiconducting principle of monetary and environmental values exchange. *Economics and Business Letters*, 10(3), 284-290. <https://doi.org/10.17811/ebl.10.3.2021.284-290>
- [14] Trading Economics. (2023). Nickel. <https://tradingeconomics.com/commodity/nickel> (accessed: Oct 13, 2023)
- [15] Reuters. (2023, Sept. 12) . Almina-Minas halts zinc and lead concentrate operations at Aljustrel. <https://www.reuters.com/markets/commodities/almina-minas-halts-zinc-lead-concentrate-operations-aljustrel-2023-09-12/>

[16] Ziehn, T., Lenton, A., & Santana-Falcón, Y. (2023). Even temporary global warming above 2°C will affect life in the oceans for centuries.

<https://www.csiro.au/en/news/All/Articles/2023/October/marine-impacts-climate-change>

[17] Graham, T. (2023, Oct. 12). Deforestation in Bolivia has jumped by 32% in a year.

What is going on?. <https://www.theguardian.com/global-development/2023/oct/12/deforestation-in-bolivia-has-jumped-by-32-in-a-year-what-is-going-on>

[18] Vuong, Q. H. (2023). *Meandering Sobriety*.

<https://www.amazon.com/dp/B0C2RZDW85>

[19] Nguyen, M. H., & Jones, T. E. (2022). Building eco-surplus culture among urban residents as a novel strategy to improve finance for conservation in protected areas.

Humanities and Social Sciences Communications, 9, 426.

<https://www.nature.com/articles/s41599-022-01441-9>