研究報告

赤泥のろ過、乾燥特性*

Filtration and Drying Characteristics of Red Mud

広末 英 晴** 安 部 英 一** 横 田 章**
Hideharu Hirose Eiichi Abe Akira Yokota

1. はじめに

赤泥は、バイヤー法を用いて、ボーキサイトからアルミナを製造する工程から排出される産業廃棄物である。わが国では、乾泥換算量で、年間約100~150万トンの赤泥が廃棄されている¹⁾。プラントから系外へ排出される赤泥は、固体の重量濃度で約0.2~0.3のスラリーである。母液はカセイソーダを主体とするアルカリ液であり、pH=12~13である。

赤泥の有効利用については、すでに数多くの研究が行なわれ、これらは明石ら²⁾によってまとめられている。しかしながら、現在までのところ、赤泥の基礎的特性についてはあまり調べられていない。そこで、本報では、赤泥を利用する際に必要な基礎的現象の一つであるろ過および乾燥特性について検討を加え、いくつかの有用な知見をえたので、その結果を報告する。

2. 実験装置および実験方法

2.1 実験試料

本実験において用いられた赤泥は、北九州市若松区の三井アルミナ製造㈱のものである***。その化学成分をTable 1に示し、アンドレアセンピベット法を用いて測定された粒径分布をFig.1に示す。同図より、用いた赤泥の50wt%径は、約3 μ mであることがわかる。また、

Fig. 1 粒径分布

2.2 ろ過特性

前報⁴⁾に示したものと同一の圧縮透過試験装置(内径70mm ϕ)および方法を用いて、赤泥圧縮ケーキ層の平衡空隙率 ε_x およびケーキの部分比抵抗 α_x 対圧縮圧力 p_s の関係を測定した。すなわち、ある一定荷重のもとで、圧縮透過試験装置を用いて赤泥スラリーをろ過、圧縮する。えられるケーキが圧縮平衡に達したところで、その厚さをダイヤルゲージにより測定し、平衡空隙率を求め、ひきつづいて、そのケーキ層について赤泥上澄液による透過実験を行なうことにより部分比抵抗を求めた。

Table 1 赤泥の化学成分

Ig. Loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Total
8.72	7.52	19.19	47.30	8.32	3.81	0.32	4.32	0.32	99.82

水置換ピクノメータ法³⁾による赤泥の真密度は3.51 g/cm³であった。

昭和53年10月5日受理

* 昭和53年度粉体工学学会秋期研究発表会にて講演(1978.10東京)

** 九州工業技術試験所(〒841 鳥栖市宿町)

TEL 09428-2-5161

*** ここでは、試料として三井アルミナ製造㈱の赤泥のみを用いたが、赤泥は、バイヤー法を用いてアルミナをえる際の副産物であること、したがって、その性質もおおよそ同じと考えられることから、本報でえられる結論は、同社の赤泥のみならず、ほとんどすべての赤泥にも適用できると考えられる。

Fig. 2 定圧ろ過実験装置

荷重を逐次増し、同様の実験を繰り返し行なうことにより p_s 対 ε_x および α_x の関係をえた。ついで、Fig. 2 に示されるろ過面積 63.62 cm^2 のステンレス製ポンプフィルターを用いて、赤泥スラリーの定圧ろ過実験を行ない、Ruth の定圧ろ過係数を測定した。実験方法はつぎのとおりである。あらかじめ空隙を水で置換したステンレス焼結金属板上にろ紙をしいたのち、既知温度のスラリーをフィルターに注入する。所定の圧力に調節された空気タンクとフィルターとを連結し、定圧ろ過を開始する。ろ液は、コック操作により、2本の25ccのビュレットに交互に導かれ、ろ液量と、それに対応するろ過時間とが測定された。これより、(1)式を用いて、Ruth の定圧ろ過係数 $k [\text{cm}^2/\text{sec}]$ が求められた⁵⁾。

$$\frac{d\theta}{dv} = \frac{2(v + v_0)}{k} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 v ：単位ろ過面積当りのろ液量、 v_0 ：ろ材抵抗と等価の仮想ろ液量、 θ ：ろ過時間。

なお、 k は(2)式によって表わされる。

$$k = \frac{2g_c p(1 - ms)}{\mu \rho s \alpha} \quad \dots\dots(2)$$

ここで、 g_c ：重力換算係数、 p ：ろ過圧力、 m ：ろ過

ークの湿乾質量比、 s ：スラリーの濃度、 ρ ：ろ液の密度、 μ ：ろ液の粘度、 α ：平均ろ過比抵抗。

ろ過圧力の範囲は $500 \sim 3000 [\text{G}/\text{cm}^2]$ であった。また、定圧ろ過実験に用いられた赤泥スラリーの濃度は、重量基準で 0.324 および 0.175 の2種類であった。

2.3 乾燥特性

まず赤泥スラリー(固体の重量濃度で約 0.3) をろ過、乾燥することによって、含水率 $w=0.35$ 程度の試料をつくり、ついで真空土練成型機を用いて、これから $2 \text{ cm} \phi \times 5 \text{ cm}$ の円筒成型体を作成し、乾燥用試料とした。そして、円筒側面をポリエチレンのシートと幅 3.5 mm の輪ゴムとを用いて被覆した。したがって、乾燥は円筒の両端面のみから行なわれた。用いられた実験装置のフローシートを Fig. 3 に示す。送風機によって送られた空気は、脈動どめタンク、流量計、加熱器をへて風洞へと入る。上述の試料は、乾燥面が熱風と平行に接するように、細い竹棒によって風洞直上に静置され、これを間歇的に系外へとりだし、その重量を測定することによって乾燥速度を測定した。同図中の風洞の形、寸法は堀⁶⁾によって提案された方法によって決定されたものであり、出口の直径は $80 \text{ mm} \phi$ であった。風洞出口における空気の温度分布は $\pm 2^\circ \text{C}$ 以内、速度分布は $\pm 2\%$ 以内であった。ただし、加熱空気の湿度調節は行なわれていないので、実験中に湿度が最大 $\pm 2\%$ 程度変化した場合もあった。

3. 実験結果および考察

3.1 ろ過特性

Fig. 4 に圧縮実験結果を示し、Fig. 5 に透過実験結果を示す。両図より、 ε_x 、 α_x に対する赤泥濃度の影響は認められず、 ε_x 、 α_x と p_s との関係を表わす式として(3)、(4)式をえる。

$$\varepsilon_x = 0.840 - 0.0196 p_s^{0.286} \quad \dots\dots(3)$$

$$\alpha_x = 0.27 \times 10^{11} + 0.102 \times 10^{10} p_s^{0.598} \quad \dots\dots(4)$$

これらの実験式の実験値に対する偏りは、 ε_x において

Fig. 3 乾燥速度測定装置

Fig. 4 圧縮実験結果, ε_x 対 p_s

Fig. 5 透過実験結果, α_x 対 p_s

±2%, α_x において±13%であった。

つぎに, 定圧ろ過係数 k は, (1)式にもとづいて, $\Delta\theta/\Delta v$ を v に対して点綴すれば, その勾配からもとめられるが, ここでは, $\Delta\theta/\Delta v$ を次式⁷⁾の關係を用いて, 20°C における値 $(\Delta\theta/\Delta v)_{20}$ に換算し, 20°C における Ruth の定圧ろ過係数 k_{20} を求めた。

$$\left(\frac{\Delta\theta}{\Delta v}\right)_{20} = \left(\frac{\Delta\theta}{\Delta v}\right) \frac{\mu_{20}}{\mu} \quad \dots\dots(5)$$

実験結果の一例を $s=0.324$ の場合について Fig. 6 に示す。このようにしてえられた k_{20} 対 p の關係を Fig. 7 に示す。つぎに, 白戸⁸⁾ によって展開された近代ろ過理論を用いて, k_{20} 対 p の關係の推算を試みる。

平均ろ過比抵抗 α は, ろ材抵抗を無視すれば, 次式によって求められる。

$$\alpha = \frac{1}{1 - \varepsilon_{av}} \int_0^1 \left(\frac{q_x}{q_1} - \varepsilon_x\right) d\left(\frac{x}{L}\right) \frac{p}{\int_0^p \frac{dp_s}{\alpha_x}} = J_R \cdot \alpha_R \quad \dots\dots(6)$$

ただし, $\alpha_R = p / \int_0^p \frac{dp_s}{\alpha_x}$: Ruth の平均比抵抗,

Fig. 6 $(\Delta\theta/\Delta v)_{20}$ 対 v

Fig. 7 Ruth の定圧ろ過係数 k_{20} 対ろ過圧力 p

$$J_R = \frac{1}{1 - \varepsilon_{av}} \int_0^1 \left(\frac{q_x}{q_1} - \varepsilon_x\right) d\left(\frac{x}{L}\right) : \text{補正係数。}$$

(6)式中の q_x/q_1 は, ケーク内のろ液流速分布であり, 物質収支をとることによって, 次式によって表わされる⁸⁾。

$$\frac{q_x}{q_1} = 1 - \frac{(\varepsilon_x - \varepsilon_{avx})(m-1)}{\varepsilon_{av}(1-m)s} s \frac{x}{L} \quad \dots\dots(7)$$

ここで、 m ：ケーキの湿乾質量比、 ε_{av} ：厚さ L のケーキ全体の平均空隙率、 ε_{avx} ：ろ材から距離 x までのケーキの平均空隙率。

上式中の m および ε_{av} は、それぞれ(8)、(9)式で与えられる。

$$m = 1 + \frac{\rho \varepsilon_{av}}{\rho_s (1 - \varepsilon_{av})} \quad \cdots \cdots (8)$$

$$\varepsilon_{av} = \int_0^1 \varepsilon_x d\left(\frac{x}{L}\right) \quad \cdots \cdots (9)$$

また、ケーキ内の流動基礎式から次式がえられる⁹⁾。

$$\frac{\int_0^{x/L} \frac{(q_x/q_1) - \varepsilon_x}{1 - \varepsilon_x} d\left(\frac{x}{L}\right)}{\int_0^1 \frac{(q_x/q_1) - \varepsilon_x}{1 - \varepsilon_x} d\left(\frac{x}{L}\right)} = 1 - \frac{\int_0^{p_s} \frac{dp_s}{\alpha_x (1 - \varepsilon_x)}}{\int_0^p \frac{dp_s}{\alpha_x (1 - \varepsilon_x)}} \quad \cdots \cdots (10)$$

したがって、(7)、(10)式から q_x/q_1 対 x/L 、 ε_x 対 x/L の関係を試誤法によって求めれば¹⁰⁾、(6)、(8)式から、 α 、 m を求めることができ、最終的には、 k_{20} 対 p の関係を(2)式からえることができる。Fig. 7中の実線は、このようにして計算された結果である。また、同図中の点線は、ケーキ内におけるろ液および固体粒子の速度分布がないとした場合、すなわちRuthの平均比抵抗を用いて計算された結果である($s=0.175$ の場合は、実線と点線はほぼ一致したので実線のみを記入した)。両者とも、実験値と計算値とはよく一致していることが認められる。よって、この程度のスラリー濃度では、赤泥スラリーの圧縮透過データを測定すれば、近代ろ過理論あるいはRuthの理論をもちいて、赤泥スラリーを任意の濃度、圧力のもとでろ過した場合の定圧ろ過係数の推算が可能であると考えられる。なお、赤泥スラリーの α の範囲は、 $5 \times 10^{10} \text{cm/g}$ ($p=500 \text{G/cm}^2$) $\sim 1.3 \times 10^{11} \text{cm/g}$ ($p=8000 \text{G/cm}^2$)であった。また、白戸ら¹¹⁾は、ケーキの成長速度からろ過の程度を、ろ過性良好、中程度、悪いの三段階に分類している。よって、上述のろ過特性値にもとづいて、赤泥ケーキの成長速度を求めると、 $s=0.1$ の場合に成長速度は 0.14cm/min ($p=500 \text{G/cm}^2$) $\sim 0.25 \text{cm/min}$ ($p=8000 \text{G/cm}^2$)となり、赤泥ケーキのろ過性は“中程度”と“悪い”の間に位置づけられることがわかった。

3.2 乾燥特性

赤泥成型体の乾燥収縮特性、すなわち湿り比容積 V_b と含水率 w との測定結果をFig. 8に示す。ただし、 w が0.35以下では、赤泥成型体の容積は水銀置換法で求められた。また、 w が0.35以上の範囲でえられた V_b 対 w の関係(Fig. 8中に×印で示されるデータ)は、圧縮

Fig. 8 湿り比容積 V_b と含水率 w の関係

透過実験からえられた結果である。Fig. 8において、高含水率域(図中のa—b間)では、 V_b 対 w の関係は勾配45°の直線で表わされる。直線a—bの延長と縦軸との交点をdとすれば、d点の値は赤泥の真密度の逆数と正確に一致する。一方、低含水率域(図中のb—c間)では、 V_b は一定値を示す。すなわち、a—b間では、赤泥粒子は液体中に懸濁した状態にあり、乾燥されるにつれて、粒子間の水分が減少すると同時に、赤泥粒子は互いに接近する。この時の赤泥成型体の収縮量は、脱水量の容積に等しい。図中のb点の含水率は、粒子間の収縮が停止する含水率、すなわち赤泥粒子が互いに完全に接触している状態を表わす含水率であり、限界含水率 w_c ($=0.26 \text{g/g}$ 赤泥)に一致するといわれている¹²⁾。これ以上、成型体を乾燥しても、もはや収縮はおこらない。Fig. 8より、つぎの関係がえられる¹²⁾。

$w > w_c$ では

$$V_b = V_s + V_w w = V_s (1 + \gamma w) \quad \cdots \cdots (11)$$

$w \leq w_c$ では

$$V_b = V_{be} = V_s + V_w w_c = V_s (1 + \gamma w_c) \quad \cdots \cdots (12)$$

ここで、 V_{be} ： $w=0$ の赤泥成型体のかさ比容積($=0.55 \text{cm}^3/\text{g}$)、 V_s ：赤泥の比容積($=1/\rho_s$)、 V_w ：水の比容積($=1.0 \text{cm}^3/\text{g}$)、 γ ：赤泥の比重。

したがって、赤泥成型体の乾燥収縮特性は、赤泥の真密度 ρ_s 、赤泥成型体のかさ比容積 V_{be} 、成型体の含水率 w をあらかじめ知れば求められる。

Fig. 9に赤泥成型体の乾燥速度の実験結果を示す。 $w > w_c$ においては、乾燥面積は時間の経過とともに減少

Fig. 9 乾燥速度実験結果

する。この乾燥面積は、成型体の収縮は等方的であると仮定することによってえられる次式によって求められた。

$$\frac{S}{S_e} = \frac{(\pi/4)(D_e + \Delta D)^2}{(\pi/4) D_e^2} = \left(\frac{V_b}{V_{be}}\right)^{2/3} \quad \dots\dots(13)$$

ここで、 S ：任意の状態における赤泥成型体の乾燥面積、 S_e 、 D_e ：絶乾後の成型体の乾燥面積、直径、 ΔD ：成型体の直径の微小変化量。

Fig. 9 中に点綴された粘土（鹿児島県大口市および長崎県杵岐から産出するカオリンを主成分とする粘土である）の実験値は、赤泥と同一方法、同一条件のもとでえられた。粘土の場合は、従来からいわれているように、恒率乾燥期間と減率乾燥期間とが明確にあらわれる。しかし、赤泥成型体の場合は、Fig. 8 から、 $w_c \approx 0.26$ と認められるにもかかわらず、恒率乾燥期間はほとんどあらわれず、乾燥開始後直ちにみかけ上の減率乾燥期間*がはじまる（ただし、乾燥速度が遅い場合は、乾燥初期に恒率乾燥期間がわずかにみられた）。これは、すでに NaCl 溶液を加えた粘土の乾燥実験¹³⁾において説明されているように、赤泥成型体の乾燥面近くでの溶質成分（NaOH など）の析出、蓄積によるものと思われる。つ

* ここで取り扱った赤泥成型体のように溶質成分を含む材料では、後述のように、水分の移動は液状水の状態で行なわれていると考えられるにもかかわらず、乾燥特性曲線からは、減率乾燥期間に入っているような結果がえられる。この現象は、乾燥特性曲線および水分移動状態にもとづいて乾燥期間を両期間にわたる定義¹⁴⁾によっては説明されないの、本報では、この現象がみられる $w > w_c$ の期間をみかけ上の減率乾燥期間とよぶことにする。

Fig. 10 含水率分布と Na⁺ 濃度分布

ぎに、この点について検討を加える。

Fig. 10 は、各乾燥時間における赤泥成型体の軸方向における水分分布を測定した結果である。ただし、この実験では、乾燥速度測定の場合とは異なり、軸方向における水分勾配を大きくするために、円筒の一端からのみ乾燥を行ない、他端は側面と同様ポリエチレンシートで被覆された。粘土の乾燥においては、存在する水の状態の違いのために、 $w = w_c$ では水分分布はおおよそ均一になることが知られている¹⁴⁾。Fig. 10 においても、Fig. 8 より求められる $w_c = 0.26$ に近い約 0.27 近くにおいて水分分布がかなり均一になり、この前後では水分分布が大き

くなる現象がみられる。このことは、前述のように、赤泥の乾燥速度曲線からは $w=0.26\sim0.34$ において、すでに減率乾燥期間が始まっているように観察されるけれども、実際は乾燥収縮特性より求められた $w_c=0.26$ 近くまでは、成型体の収縮をともないながら水分は液状水の状態で移動することを示していると思われる。

同図中に示される点線は、5時間乾燥後の各赤泥成型体（軸方向長さは約0.5cmである）中に含まれる Na^+ の濃度分布を原子吸光分光分析法によって測定した結果である*。この図より、乾燥面を含む部分（表面より約0.55cmの円筒）の Na^+ の平均濃度は、他の場所のそれの約2倍である。すなわち、 $w>w_c$ においては、すでに明らかにされているように、成型体内の水分移動は、液状水の状態で行われ、乾燥面へと輸送され、ここで乾燥されるために、溶質成分の濃度が上昇したと考えられる（乾燥面を含む部分における Na^+ の増加量は、これ以外の部分における Na^+ の減少量とおおよそ一致する）。また、乾燥表面近傍における Na^+ の濃度は約0.55cmの円筒部での Na^+ の平均値より、さらに高いと推察される。

* 実験方法は以下のとおりである。まず、各赤泥成型体を乾燥、微粉砕、乾燥したのち、約1gを精秤し、これを約300ccの水中へいれ、10分間攪拌、混合することによって、赤泥粒子表面に存在する Na^+ を水中へ溶解させた。ついで、これをろ過し、ろ液を必要な程度まで、希釈することによって、原子吸光分光分析用の試料とした。

したがって、乾燥面においては、析出、蓄積した溶質成分が毛管を部分的あるいは全面的にふさぐために¹⁸⁾、液状水の移動が困難となり、乾燥速度が低下し、みかけ上減率乾燥期間が観察されたと考えられる。

4. ま と め

赤泥スラリー（三井アルミナ製造物のもの）のろ過、乾燥特性を調べ、つぎの結果をえた。

1. 赤泥スラリーの圧縮透過データ、すなわち平衡空隙率および部分比抵抗を表わす実験式として(3)、(4)式をえた。
2. 近代ろ過理論および Ruth の理論を用いて Ruth の定圧ろ過係数を計算し、これを実験値と比較したところ、両者とも実験値とよく一致することが認められた。
3. 赤泥成型体の乾燥収縮特性は、赤泥の真密度、成型体の含水率および絶乾時成型体のかさ比容積をあらかじめ知れば推定される。
4. 赤泥成型体の乾燥速度は、溶質成分の影響を受け、湿り比容積対含水率（Fig. 8）の曲線から予測される限界含水率より高い含水域からみかけ上の減率乾燥期間があらわれる。

謝 辞

原子吸光分光分析を行なうにあたり、協力していただいた当所の山田則行技官に感謝の意を表します。

使 用 記 号

D : 赤泥成型体の直径	[cm]	w_c : 限界含水率	[-]
g_c : 重力換算係数	[g·cm/G·sec ²]	x : ろ材面からの距離	[cm]
k : Ruth の定圧ろ過係数	[cm ² /sec]	α : 平均ろ過比抵抗	[cm/g]
L : ケークの全厚さ	[cm]	α_R : Ruth の平均比抵抗	[cm/g]
m : ケークの湿乾質量比	[-]	α_x : 部分比抵抗	[cm/g]
p : ろ過圧力	[G/cm ²]	α_i : $p_s=0$ における α_x	[cm/g]
p_s : ケーク圧縮圧力	[G/cm ²]	γ : 赤泥の比重	[-]
q_i : ろ過速度	[cm/sec]	ε_{av} : ケークの平均空隙率	[-]
q_x : ろ液の局所空塔速度	[cm/sec]	ε_x : 平衡空隙率	[-]
S : 赤泥成型体の乾燥面積	[cm ²]	ε_i : $p_s=0$ における ε_x	[-]
s : スラリー中の固体の重量濃度	[-]	θ : ろ過時間	[sec]
V_b : 赤泥成型体の湿り比容	[cm ³ /g]	μ : ろ液の粘性係数	[g/cm·sec]
V_s : 赤泥の比容	[cm ³ /g]	ρ : ろ液の密度	[g/cm ³]
V_w : 水の比容	[cm ³ /g]	ρ_s : 固体の真密度	[g/cm ³]
v : 単位ろ過面積当りのろ液量	[cm ³ /cm ²]	添 字	
v_0 : ろ材抵抗と等価の仮想ろ液量	[cm ³ /cm ²]	e : 絶乾状態	
w : 含水率（乾量基準）	[-]	20 : 20°C における値	

引 用 文 献

- 1) 柳田博明, 清水紀夫: 化学工学, 41, 369 (1977)
- 2) 明石和夫, S. J. Shiao: 軽金属, 26, 150 (1976)

- 3) 三輪茂雄：粉体工学研究会誌, **6**, 115 (1969)
- 4) 安部英一, 広末英晴, 横田章：粉体工学研究会誌, **14**, 11 (1977)
- 5) 白戸紋平, 村瀬敏朗, 三分一政男, 新垣 勉：化学工学, **40**, 606 (1976)
- 6) 堀 栄一：航空学会誌, **11**, 229 (1963)
- 7) 三分一政男, 大槻久美子, 藤尾雄策, 上田誠之助：醸酵工学, **49**, 880 (1971)
- 8) 白戸紋平, 三分一政男, 加藤宏夫, 新垣 勉：化学工学, **31**, 359 (1967)
- 9) 新垣 勉：名古屋大学学位論文 (1971)
- 10) 白戸紋平, 三分一政男：化学工学, **27**, 470 (1963)
- 11) 白戸紋平, 新垣 勉：ケミカル・エンジニアリング, **18**, 754 (1973)
- 12) 若林嘉一郎, 山口信吉, 松本利達, 三田哲朗：化学工学論文集, **3**, 189 (1977)
- 13) Newitt, D.M., P. Na Nagara and A.L. Papadopoulos : *Trans. Instn. Chem. Engrs.*, **38**, 273 (1960)
- 14) 桐栄良三：“最近の化学工学”, p.203~227, 丸善 (1968)

Authors' Abstract

Filtration and Drying Characteristics of Red Mud

by

Hideharu HIROSUE, Eiichi ABE and Akira YOKOTA

(Government Industrial Research Institute, Kyushu)

This paper deals with filtration and drying characteristics of red mud which is a waste from Bayer process to produce alumina.

First, the equilibrium porosity and the local specific filtration resistance of red mud slurry were measured at various compressive pressures and experimental equations were obtained. The Ruth's coefficient in a case of constant pressure filtration was calculated on the basis of the modern filtration theory and the Ruth's theory, respectively, and the both calculated values were compared with experimental data.

Secondly, shrinkage characteristics and drying rate of the sample bed prepared by forming wet red mud into a cylindrical shape were measured. The results indicated that the shrinkage characteristics could be estimated from the data of the true density of red mud, the moisture content of the sample bed and the specific volume of the dried sample bed. Furthermore, it was clarified that drying rates were affected by the solute material in the red mud slurry deposited at and near drying surface.

List of Figures and Table

Fig. 1 Particle size distribution. Fig. 2 Experimental apparatus for constant pressure filtration. Fig. 3 Experimental apparatus for measuring drying rate. Fig. 4 Experimental results of compression test, ε_x vs. p_s. Fig. 5 Experimental results of permeability test, α_x	vs. p_s. Fig. 6 $(\Delta\theta/\Delta v)_{20}$ vs. v. Fig. 7 k_{20} vs. filtration pressure p. Fig. 8 Relationship between V_b and w. Fig. 9 Experimental results of drying rate. Fig. 10 Experimental results of moisture content and Na^+ concentration distribution. Table 1 Chemical composition of red mud.