

Potensi Oksida Logam Tanah Jarang dari Lumpur Sidoarjo sebagai Pendukung Katalis Rutenium dalam Produksi Hidrogen dari Dekomposisi Amonia

Rifqi Fajar Maulana^{1*}, Uray Keisya Ranaputri¹

¹Departemen Kimia Fakultas MIPA Universitas Brawijaya, Malang

Abstrak

Salah satu upaya mengurangi emisi CO₂ adalah transisi bahan bakar fosil dengan bahan bakar terbarukan seperti hidrogen. Hidrogen dapat diproduksi melalui dekomposisi amonia oleh katalis Ru dengan pendukung oksida dari logam tanah jarang (LTJ). Meskipun di alam tidak tersebar merata dan jumlahnya terbatas, LTJ dilaporkan terkandung di Lumpur Sidoarjo - Indonesia. Selain itu, Indonesia merupakan negara penghasil amonia terbesar kelima di dunia sehingga keberlanjutan amonia sebagai sumber hidrogen terjamin. Kajian ini bertujuan untuk mempelajari (1) potensi pemanfaatan dekomposisi amonia menjadi hidrogen sebagai bahan bakar terbarukan, dan (2) potensi pemanfaatan oksida LTJ dari Lumpur Sidoarjo sebagai katalis pendukung Ru dalam dekomposisi amonia menjadi hidrogen sebagai bahan bakar terbarukan. Kajian dilakukan menggunakan pendekatan narrative review dengan menelaah jurnal nasional dan internasional terakreditasi yang diterbitkan mulai tahun 2013-2023. Hasil kajian mengindikasikan bahwa (1) LTJ yang terdapat di Lumpur Sidoarjo meliputi Sc, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, dan Y yang dapat diekstraksi menjadi bentuk oksida menggunakan metode hidrometalurgi; (2) oksida-oksida LTJ yang berpotensi sebagai pendukung katalis Ru dan mampu mengkonversi NH₃ menjadi H₂ hingga 100% pada rentang suhu 400-475°C dan tekanan normal, meliputi CeO₂, La₂O₃, Er₂O₃, Y₂O₃, Sm₂O₃, Pr₆O₁₁; (3) Lumpur Sidoarjo mengandung jenis LTJ yang sama seperti LTJ yang telah diteliti sebagai pendukung katalis Ru dalam dekomposisi amonia untuk produksi hidrogen, yakni La (15-50 ppm), Ce (41-87 ppm), Pr (5-24,5 ppm), Sm (2-10,5 ppm), Er (1,5-3 ppm), dan Y (8-23 ppm) sehingga kawasan Lumpur Sidoarjo berpotensi untuk dieksplorasi lebih lanjut dan dilakukan ekstraksi LTJ sebagai katalis.

Kata kunci: dekomposisi amonia, energi hidrogen, katalis rutenium, logam tanah jarang, lumpur Sidoarjo

Abstract

One of the efforts to reduce CO₂ emissions is the transition from fossil fuels to renewable fuels such as hydrogen. Hydrogen can be produced by decomposing ammonia by a Ru catalyst with oxide support of rare earth metals (REEs). Although in nature, it is not evenly distributed and the number is limited, rare earths are reported to be contained in Sidoarjo Mud - Indonesia. In addition, Indonesia is the fifth largest ammonia-producing country in the world, so the sustainability of ammonia as a hydrogen source is guaranteed. This study aims to study (1) the potential utilization of the decomposition of ammonia into hydrogen as a renewable fuel and (2) the potential utilization of LTJ oxide from Sidoarjo Mud as a catalyst supporting Ru in the decomposition of ammonia into hydrogen as a renewable fuel. The study used a narrative review approach by examining accredited national and international journals published from 2013-2023. The results of the study indicate that (1) the REEs found in Lumpur Sidoarjo include Sc, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, and Y, which can be extracted into the oxide form using the hydrometallurgical method; (2) LTJ oxides that have the potential to support Ru catalysts and are capable of converting NH₃ to H₂ up to 100% at a temperature range of 400-475°C and normal pressure, including CeO₂, La₂O₃, Er₂O₃, Y₂O₃, Sm₂O₃, Pr₆O₁₁; (3) Sidoarjo mud contains the same types of REEs as REEs which have been studied as a support for Ru catalysts in ammonia decomposition for hydrogen production, namely La (15-50 ppm), Ce (41-87 ppm), Pr (5-24.5 ppm), Sm (2-10.5 ppm), Er (1.5-3 ppm), and Y (8-23 ppm) so that the Sidoarjo Mud area has the potential to be further explored and REEs extracted as a catalyst.

Keywords: ammonia decomposition, hydrogen fuel, rare earth element, ruthenium catalyst, Sidoarjo mud

PENDAHULUAN

Emisi CO₂ terus menerus meningkat dan menimbulkan dampak negatif bagi kesehatan

manusia maupun lingkungan. Sektor transportasi berkontribusi menghasilkan sekitar 23% dari emisi total CO₂ (2022) atau sekitar 800 miliar ton CO₂ dan menunjukkan tren kenaikan setiap tahunnya. Setelah pembangkit listrik dan industri, transportasi merupakan sektor penghasil emisi CO₂ tertinggi ke-3 di dunia dibandingkan sektor lain [1].

Alamat Korespondensi Penulis:

Rifqi Fajar Maulana

Email : rifqifmaulana@student.ub.ac.id

Alamat : Universitas Brawijaya, Jl. Veteran, Ketawanggede,
Kec. Lowokwaru, Kota Malang, Jawa Timur 65145

Era sekarang ini manusia masih bergantung pada bahan bakar fosil dalam keseharian hidupnya. Saat ini, bahan bakar fosil memenuhi 80% dari total penggunaan energi dunia dan diprediksi akan terus digunakan hingga tahun 2040 [1]. Akan tetapi, penggunaan bahan bakar fosil menimbulkan permasalahan yang serius bagi lingkungan, yaitu menimbulkan emisi gas rumah kaca yang menyebabkan pemanasan global dan berakhir pada perubahan pola iklim yang merugikan berbagai sektor. Salah satu Gas Rumah Kaca (GRK) yang telah banyak diemisikan ke udara adalah CO₂. Tidak dapat dipungkiri bahwa setiap hari manusia pasti menggunakan bahan bakar fosil untuk menjalankan transportasi sehingga semakin banyak CO₂ yang diemisikan ke udara [2]. Di sisi lain, penggunaan bahan bakar fosil semakin menipis dan tidak dapat memenuhi permintaan energi dunia dalam waktu lama sehingga penggunaan energi bersih potensial untuk dikembangkan saat ini.

Hidrogen merupakan bahan bakar yang ramah lingkungan. Sebagian besar hidrogen diproduksi melalui reformasi gas alam. Akan tetapi, gas alam hanya akan tersedia hingga 37 tahun mendatang atau hingga tahun 2060, proses reformasi gas alam menghasilkan CO₂ sebagai produk samping, dan memerlukan tekanan (3-25 bar) serta suhu yang tinggi (700-1000°C) [3]. Selain itu, juga terdapat masalah dalam penyimpanan dan transportasi hidrogen yang rumit serta memerlukan biaya mahal. Penyimpanan hidrogen dalam bentuk gas tidak efisien karena kerapatan energi volumetriknya rendah, sedangkan penyimpanan hidrogen dalam bentuk cair memerlukan bejana bertekanan tinggi, berinsulasi, dan sistem khusus karena suhu penguapan hidrogen yang sangat rendah, yaitu -253°C [4].

Amonia merupakan salah satu media penyimpanan dan transportasi hidrogen yang efisien, murah, dan aman. Amonia dapat dikonversi menjadi amonia cair sehingga memudahkan proses distribusi. Hidrogen dapat diperoleh secara mudah dari proses dekomposisi amonia. Proses tersebut tidak menimbulkan jejak emisi karbon sehingga dinilai lebih ramah lingkungan [4]. Terlebih lagi, Indonesia merupakan negara penghasil amonia terbesar ke-5 di dunia dengan rata-rata produksi tiap tahunnya sekitar 5.000 metrik ton sehingga sangat potensial jika konsep ini diterapkan di Indonesia [5].

Proses dekomposisi amonia menjadi hidrogen memerlukan suatu katalis untuk meningkatkan

kinerjanya. Katalis paling unggul yang digunakan dalam dekomposisi amonia adalah katalis berbasis Rutenium (Ru) [6]. Akan tetapi, Ru merupakan logam yang langka dan sangat mahal sehingga perlu dipadukan dengan katalis logam lain supaya kinerjanya tetap maksimal, tetapi berbiaya rendah. Salah satu logam yang terbukti mempunyai aktivitas katalitik yang baik adalah Logam Tanah Jarang (LTJ). Indonesia mempunyai sumber LTJ yang melimpah di Lumpur Sidoarjo dan dalam bentuk oksidanya dapat digunakan sebagai katalis pendukung dalam dekomposisi amonia sehingga meningkatkan kinerja katalis Ru yang tentunya juga meningkatkan laju produksi hidrogen [7].

Oleh karena itu, penulis melakukan kajian tentang potensi pemanfaatan dekomposisi amonia menjadi hidrogen sebagai bahan bakar terbarukan, dan potensi pemanfaatan oksida LTJ dari Lumpur Sidoarjo sebagai katalis pendukung Ru dalam dekomposisi amonia. Hasil kajian ini diharapkan dapat menjadi rujukan untuk pengembangan katalis pendukung Ru dalam dekomposisi amonia yang melimpah dan terjangkau dengan memanfaatkan sumber daya lokal yang ada di Indonesia.

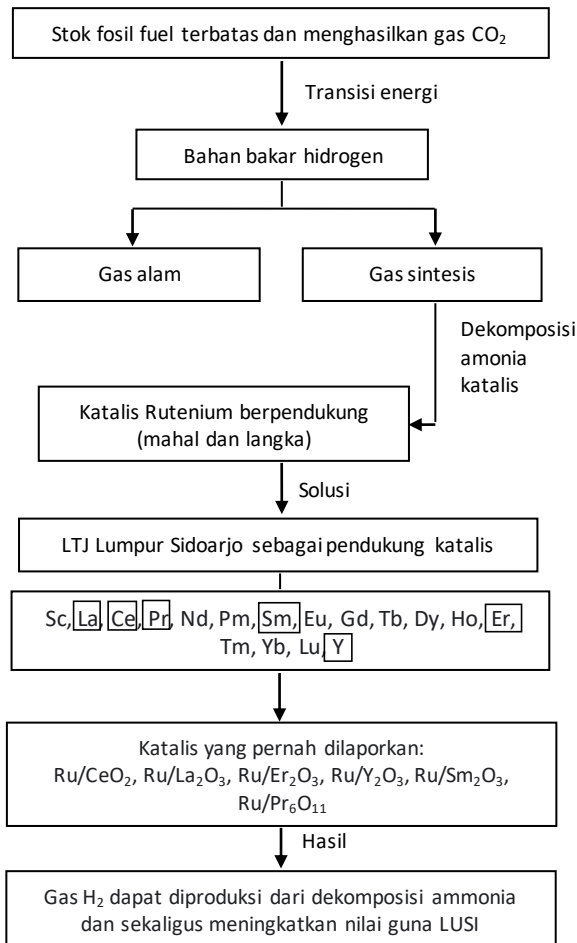
METODE PENELITIAN

Studi ini dilakukan menggunakan pendekatan *narrative review* yang difokuskan pada artikel-artikel hasil penelitian yang melaporkan tentang: (1) kandungan LTJ di Lumpur Sidoarjo, dan (2) penggunaan oksida LTJ sebagai katalis pendukung Ru dalam proses dekomposisi amonia. Penelusuran pustaka dibatasi dengan beberapa kata kunci dalam Bahasa Indonesia maupun Bahasa Inggris, misalnya: kandungan logam dan mineral Lumpur Sidoarjo, produksi hidrogen dari dekomposisi amonia, katalis dekomposisi amonia, dan katalis ruthenium-logam tanah jarang.

Artikel dipilih dari basis data jurnal, seperti ScienceDirect, ProQuest, Springer, dan Garuda Ristekdikti. Jurnal tersebut telah terindeks nasional (SINTA) dan internasional (SCImago dan Scopus) yang diterbitkan pada rentang Mei 2013 hingga Mei 2023 supaya hasil penelitian yang didapatkan masih relevan dan terbaru.

Setelah dilakukan seleksi judul, abstrak, dan pembahasan, diperoleh 31 artikel yang digunakan sebagai landasan utama dalam penulisan kajian ini. Setelah mendapatkan data, pembahasan dipaparkan secara deskriptif kualitatif untuk menjawab tujuan penelitian dan didukung tabel atau gambar untuk menyajikan

data kuantitatif. Kerangka konsep dari studi ini disajikan di Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka Berpikir

HASIL REVIEW

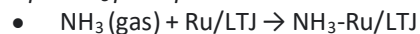
Produksi Hidrogen Melalui Dekomposisi Amonia

Amonia berpotensi untuk digunakan sebagai media penyimpanan hidrogen karena memiliki densitas gravimetri yang tinggi, massa jenis volumetrik untuk amonia cair sebesar 121 kg/m^3 , dapat disimpan dalam bentuk cair pada suhu dan tekanan atmosfer, yaitu -33°C dan tekanan 1 bar sehingga proses penyimpanan dan distribusi menjadi lebih aman. Penyimpanan amonia dalam bentuk cair juga mempunyai keunggulan, yaitu volume yang diangkut dapat lebih banyak daripada gas serta proses penanganannya yang mudah [8]. Selain itu, amonia cair memiliki energi efisiensi maksimum sebesar 46% yang lebih besar daripada metilsikloheksana (38%) dan metanol (32,2%) [9].

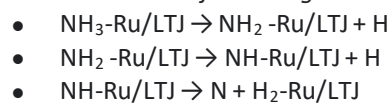
Proses dekomposisi amonia untuk menghasilkan hidrogen dapat melalui dua cara, yaitu dekomposisi elektrolitik dan dekomposisi termal. Dekomposisi termal merupakan proses

yang diminati karena mudah dan lebih murah. Suhu dan katalis berperan penting dalam dekomposisi termal [4]. Kajian ini menggunakan katalis Ru karena mempunyai efektivitas yang tinggi pada suhu $350\text{--}525^\circ\text{C}$ dan dapat dipadukan dengan oksida LTJ untuk mengurangi biaya komersialisasi [6]. Mekanisme dekomposisi amonia hingga menjadi nitrogen dan hidrogen serta regenerasi katalis mengacu pada mekanisme Langmuir-Hinshelwood seperti berikut.

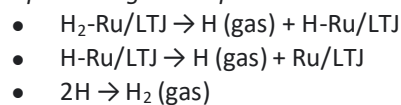
Adsorpsi NH_3 pada permukaan katalis



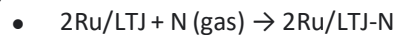
Disosiasi amonia menjadi nitrogen dan hidrogen



Desorpsi Hidrogen dari permukaan katalis



Regenerasi Katalis



Mekanisme tersebut menjelaskan bahwa mula-mula amonia teradsorpsi pada permukaan katalis Ru/oksida LTJ. Kemudian amonia mengalami disosiasi bertahap hingga diperoleh nitrogen lepas dan hidrogen yang masih berada di permukaan katalis. Hidrogen tersebut mengalami desorpsi sehingga terlepas ke udara dan membentuk H_2 yang stabil. Terakhir, nitrogen diserap kembali oleh katalis Ru/oksida LTJ untuk proses regenerasi katalis [10].

Apabila amonia telah didekomposisi, selanjutnya dilakukan pemisahan dan pemurnian lebih lanjut pada hidrogen untuk memenuhi standar aplikasi. Contohnya apabila diterapkan dalam aplikasi energi, seperti *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEM FC) dan *Fuel Cell Electrical Vehicle* (FCEV) yang memerlukan kemurnian hidrogen hingga 99,97% [8]. Beberapa teknik pemisahan dan pemurnian hidrogen yang telah banyak diteliti adalah sebagai berikut:

- *Pressure Swing Adsorption (PSA)*

PSA sudah banyak diterapkan dalam industri besar maupun percobaan skala kecil. Mekanismenya, gas dilewatkan adsorben selektif pada tekanan tinggi, lalu di beberapa titik, tekanan sistem dibalik sehingga terjadi *backflushing* senyawa yang tidak diinginkan. Karbon aktif, zeolit, dan silika merupakan adsorben yang dapat digunakan dalam proses ini.

PSA mampu menyaring kotoran dengan optimal dan menghasilkan hidrogen ultra murni sebesar 99,99% [11].

- Distilasi Kriogenik

Metode distilasi kriogenik melibatkan pendinginan pada suhu rendah dan tekanan tinggi. Hidrogen dan nitrogen dipisahkan menjadi fraksi yang berbeda berdasarkan perbedaan titik didih. Nitrogen akan terpisah pada suhu -196°C, sedangkan hidrogen pada suhu -253°C sehingga nitrogen akan terpisah lebih dulu daripada hidrogen. Nitrogen terkumpul pada bagian bawah kolom, sedangkan hidrogen murni dapat dikumpulkan dari bagian atas kolom [12].

- Membran Selektif Hidrogen

Metode ini menggunakan membran selektif berdasarkan perbedaan ukuran molekul dan sifat permeabilitas. Membran tersebut hanya memungkinkan dilewati oleh molekul berukuran kecil dan mempunyai permeabilitas yang tinggi seperti hidrogen, sedangkan nitrogen yang molekulnya lebih besar dan memiliki sifat permeabilitas lebih rendah akan tertahan pada membran. Material yang banyak digunakan sebagai membran selektif hidrogen, diantaranya polimer, keramik berpori, dan logam berpori padat [13].

Kandungan Logam dan Mineral pada Lumpur Sidoarjo

Lumpur Sidoarjo merupakan bencana semburan lumpur panas di Sidoarjo, Jawa Timur yang diakibatkan oleh kesalahan pengeboran oleh suatu perusahaan migas tahun 2006 silam. Selama 17 tahun ini, lumpur Sidoarjo terus memancarkan semburan lumpur yang merugikan bagi warga sekitar dengan volume semburan lumpur yang dihasilkan tiap harinya sebesar 30.000-50.000 m³. Tiap tahunnya, luas daerah yang terdampak lumpur semakin melebar hingga di tahun 2023 ini mencapai 11,43 km² [14]. Lumpur Sidoarjo telah diteliti mengandung berbagai logam dan mineral berharga yang mempunyai nilai ekonomi tinggi. Kajian yang telah dilakukan Rokhim et al. (2022) merangkum logam dan mineral-mineral berharga di Lumpur Sidoarjo dalam rentang tahun 2011-2021. Hasilnya disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kandungan Logam dan Oksida pada Lumpur Sidoarjo (2011-2021)

Unsur	Logam (%)		Oksida (%)	
	1000 m ²	2000 m ²	1000 m ²	2000 m ²

Unsur	Logam (%)		Oksida (%)	
	1000 m ²	2000 m ²	1000 m ²	2000 m ²
Fe	33.9	36.4	23.7	25.9
Si	33.0	31.1	45.3	43.3
Al	11	9.9	14	13
Ca	8.19	7.99	6.34	6.30
Mo	5.1	5.4	4.5	4.8
K	3.88	3.81	2.64	2.64
Ti	2.11	2.20	1.88	2.01
Sr	1.1	0.86	0.56	0.46
LTJ	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05

Sumber: Rokhim et al., 2022

Logam dan oksida pada Tabel 1 merupakan konsentrasi rata-rata yang diambil pada tahun 2011-2021 pada radius 1000 dan 2000 m² dari pusat semburan Lumpur Sidoarjo kemudian dianalisis menggunakan *X-ray fluorescence* (XRF). Kandungan logam tertinggi yang berhasil ditemukan adalah Fe, kemudian disusul oleh Si, Al, Ca, Mo, K, Ti, Sr, dan terakhir adalah logam tanah jarang dengan konsentrasi <0,05%. Selain yang dicantumkan dalam tabel, Lumpur Sidoarjo mengandung Cu, Zn, Br, V, Ni, Mn, dan Cr sebesar <1% dalam bentuk logam maupun oksida [15]. Komposisi LTJ pada Lumpur Sidoarjo secara khusus dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Kandungan Logam Tanah Jarang (LTJ) di Lumpur Sidoarjo menurut beberapa referensi

LTJ (ppm)	Referensi			
	Agusta wijaya et al., 2017	Awaludin et al., 2020	Wibowo et al., 2022	Hakim et al., 2022
Sc	-	-	17,11	18
La	67,4786	15,2778	49,73	19,22
Ce	50,6105	52,25	86,79	40,7
Pr	7,31955	5,97222	24,47	4,692
Nd	26,7418	16,8889	56,57	19,04
Sm	10,5323	1,58065	6,21	4,14
Eu	0,99136	-	7,85	1,18
Gd	4,32409	7,38889	6,49	4,02
Tb	0,74364	-	-	0,592
Dy	4,52545	1,5	0,94	3,56
Ho	1,11727	-	-	0,68
Er	2,905	1,5	-	2
Tm	0,42591	-	-	0,26
Yb	2,145	-	-	2,02
Lu	0,46227	-	-	0,308
Y	-	7,91667	23,24	19,34

Diolah dari berbagai sumber

LTJ pada Tabel 2 diteliti dari berbagai titik dan variabel yang berbeda. Agustawijaya et al. (2017) meneliti LTJ dari 2 titik Lumpur Sidoarjo dengan variasi kedalaman 0-2 m sehingga didapat 11 sampel. Kandungan LTJ dianalisis menggunakan *Neutron Activation Analysis* (NAA) dan didapat 14 jenis LTJ [16]. Penelitian Badan Geologi bersama

Puslitbang Tekmira Indonesia melaporkan 37 sampel Lumpur Sidoarjo dengan variasi kedalaman 1-10 m. Sampel tersebut dianalisis menggunakan *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS) dan didapat hasil 9 jenis LTJ [17]. Wibowo et al. (2022) meneliti 150 sampel Lumpur Sidoarjo dari 75 titik dengan jarak antar titik 100-200 m. Setelah dianalisis menggunakan XRF dan ICP-MS, dapat diketahui 10 jenis LTJ di Lumpur Sidoarjo [18]. Penelitian terbaru, yakni Hakim et al. meneliti 5 sampel Lumpur Sidoarjo dari titik yang berbeda menggunakan *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy* (ICP-OES) dan ICP-MS sehingga didapat hasil 16 unsur LTJ [19]. Berdasarkan penelitian-penelitian tersebut, La (15-50 ppm), Ce (41-87 ppm), dan Nd (17-57 ppm) merupakan LTJ yang mendominasi Lumpur Sidoarjo, kemudian disusul oleh 13 LTJ lainnya. La dan Ce mayoritas digunakan sebagai katalis, sedangkan Nd digunakan sebagai magnet permanen [17]. Akan tetapi, keempat penelitian terdahulu tidak menemukan unsur Pm di Lumpur Sidoarjo.

Kandungan LTJ terdeposit pada tanah liat dan batuan di Lumpur Sidoarjo. Agustawijaya et al. (2017) telah menganalisis sampel Lumpur Sidoarjo menggunakan *powder X-Ray Diffraction* (PXRD) untuk mengetahui kandungan tanah liat dan *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) untuk mengetahui kandungan mineral oksida. Beberapa diantaranya merupakan sumber LTJ. Sumber LTJ di Lumpur Sidoarjo serta kelimpahannya disajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Jenis Tanah dan Batuan Sumber LTJ yang Terkandung di Lumpur Sidoarjo

Tanah Liat	
Jenis Tanah Liat	Kelimpahan (%)
Smektit	16
Illit campuran Smektit/Illit	24
Kaolinit	12
Klorit	8
Batuan	
Jenis Batuan	Kelimpahan (%)
SiO ₂	44,53
Al ₂ O ₃	13,67
K ₂ O	2,68

Sumber: Agustawijaya et al., 2017

Berdasarkan data Tabel 3, dapat diketahui bahwa LTJ umumnya terperangkap pada struktur pori tanah liat jenis smektit, illit campuran smektit/illit, kaolinit, dan klorit. Umumnya, struktur tanah liat tersebut memiliki kombinasi satu satu lembar alumina oktahedral dan dua

lembar silika tetrahedral yang terikat lemah oleh ion kalium sehingga cocok untuk mengikat LTJ. Selain pada tanah, kelimpahan LTJ juga bergantung pada jenis batuan. Batuan serpih, seperti SiO₂, Al₂O₃, dan K₂O merupakan batuan di Lumpur Sidoarjo yang kaya kandungan LTJ dibandingkan batuan arenit [16].

LTJ dalam bentuk oksida umumnya dapat diekstraksi dengan metode hidrometalurgi. Mula-mula serbuk batuan yang mengandung LTJ direaksikan dengan padatan NaOH pada *furnace* dengan suhu dan waktu tertentu. Kemudian sampel dicuci menggunakan akuades disertai pengadukan pada kecepatan dan waktu tertentu. Setelah dicuci, sampel dilarutkan dalam HCl disertai pemanasan, kemudian dilakukan proses penyaringan. Filtrat direaksikan dengan NH₄OH hingga pada pH tertentu membentuk endapan. Setelah itu, dilakukan penyaringan untuk memperoleh endapan LTJ dan filtrat. Filtrat diendapkan kembali menggunakan NH₄OH hingga mencapai pH optimal pengendapan LTJ tertentu. Proses tersebut dilakukan secara berulang hingga diperoleh jenis LTJ yang diinginkan. Terakhir, sampel disaring dan endapan dikalsinasi untuk mendapatkan oksida LTJ [20].

Lebih lanjut, untuk mendapatkan LTJ dalam bentuk logam murni dapat dilakukan menggunakan metode reduksi metalotermik. Oksida LTJ dilarutkan dalam HCl, kemudian diendapkan menggunakan NH₄Cl sehingga diperoleh LTJ-klorida. Selanjutnya, LTJ-klorida dilebur melalui proses metalometri menggunakan logam Ca atau Mg dengan aditif NaCl atau CaCl₂ sehingga diperoleh LTJ murni [21]. Akan tetapi, menurut laporan Supriyanto et al. (2014), LTJ di Lumpur Sidoarjo memerlukan cara ekstraksi khusus. Peneliti tersebut mengembangkan metode pemisahan LTJ scandium (Sc) dengan senyawa *Ion Imprinted Polymer* (IIP) berbahan alil asetoasetat sebagai ligan pengompleks, asam metakrilat sebagai monomer, dan etilen glikol dimetakrilat sebagai agen *cross-linking*. Ketika Sc, didestruksi menggunakan polimer tersebut, maka Sc dapat terperangkap pada polimer dan hanya menyisakan air [22].

Meskipun konsentrasi LTJ hanya sedikit, tetapi Lumpur Sidoarjo mempunyai lokasi yang sangat luas sehingga tetap berpotensi ditemukan LTJ dalam jumlah banyak. Logam tersebut mempunyai potensi pemanfaatan yang besar dan memiliki nilai ekonomi tinggi. Sejauh ini, 55% LTJ di dunia dimanfaatkan sebagai katalis dan sisanya

sebagai material perangkat teknologi tinggi [17]. Dalam bentuk oksidanya, LTJ mempunyai aktivitas katalitik yang baik sebagai katalis dekomposisi amonia yang cocok dipadukan dengan logam mulia Ru [7]. Potensi tersebut sangat menguntungkan bagi Indonesia karena dapat menekan harga produksi katalis dan memperoleh hidrogen dengan jumlah besar dari dekomposisi amonia.

Potensi Oksida Logam Tanah Jarang sebagai Katalis Pendukung Rutenium dalam Dekomposisi Amonia

Katalis yang paling potensial untuk dekomposisi termal amonia saat ini adalah katalis berbasis Ru [4]. Efektivitas suatu katalis ditentukan oleh *Turnover Frequency* (TOF). Dalam proses dekomposisi amonia, hal tersebut didefinisikan sebagai rasio jumlah molekul amonia yang terurai oleh 1 g katalis dalam 1 detik dan jumlah situs aktif yang ada dalam 1 g katalis. Ru terbukti mempunyai efektivitas yang tinggi dibuktikan dengan nilai TOF yang tinggi [8]. Akan tetapi Ru merupakan logam yang langka dan sangat mahal sehingga meningkatkan biaya komersialisasi. Efektivitas katalis dapat meningkat ketika dipadukan dengan suatu bahan pendukung. Ru yang terbukti mempunyai aktivitas katalitik yang baik ketika dipadukan dengan oksida dari LTJ karena oksida LTJ mempunyai alkalinitas (kebasaan) permukaan yang baik [7]. Efektivitas katalis berbasis Ru/oksida LTJ dalam dekomposisi amonia sebagai penghasil hidrogen disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Efektivitas Oksida Logam LTJ sebagai Katalis Pendukung Ru dalam Dekomposisi Amonia

Katalis	Suhu (°C)	Konversi NH ₃ (%)	Laju H ₂ (mol g ⁻¹ min ⁻¹)	Ref.
Ru/CeO ₂	400	77	11,9	[23]
Ru/CeO ₂ rods	350	32	-	[23]
Ru/CeO ₂ sphere	350	25	-	[23]
Ru/Er ₂ O ₃	450	51,8	10,4	[24]
Ru/Er ₂ O ₃	350	11	-	[25]
Ru/La ₂ O ₃	450	96,5	3,2	[26]
Ru/La ₂ O ₃	350	40	-	[26]
Ru/Pr ₆ O ₁₁	350	41	-	[26]
Ru/Pr ₆ O ₁₁	450	95,4	3,4	[26]
Ru/Sm ₂ O ₃	450	84,6	25,9	[27]
Ru/Y ₂ O ₃	475	100	30,0	[28]

Diolah dari berbagai sumber

Material pendukung katalis seperti oksida LTJ memang berperan sangat penting untuk

meningkatkan kinerja katalis logam dalam dekomposisi amonia, contohnya seperti mendispersikan komponen aktif, meningkatkan luas permukaan spesifik, memodifikasi tingkat keasaman permukaan, meningkatkan stabilitas, serta konduktivitas katalis [29]. Perpaduan antara katalis yang unggul dalam dekomposisi amonia, yaitu Ru dan oksida LTJ menjadi katalis yang dapat menghasilkan hidrogen dengan jumlah yang besar [7].

Berdasarkan data pada Tabel 4, diketahui bahwa semakin meningkatnya suhu reaksi, maka persentase konversi NH₃ menjadi H₂ dan N₂ juga semakin besar. Secara stoikiometri, dekomposisi amonia menghasilkan produk dengan rasio N₂:H₂ sebesar 1:3 sehingga diperoleh hidrogen yang lebih banyak. Hal tersebut sejalan dengan prinsip kesetimbangan Le Chatelier yang menyatakan bahwa untuk mendapatkan banyak produk, maka suhu reaksi harus ditingkatkan, sedangkan tekanan harus diturunkan sehingga untuk memperoleh hidrogen dalam jumlah besar, maka suhu dekomposisi amonia harus ditingkatkan [30]. Persentase konversi tertinggi ditunjukkan oleh katalis Ru/Y₂O₃ yang dapat mengkonversi NH₃ hingga 100% pada suhu 475°C. Ketika suhu diturunkan menjadi 460°C, konversinya turun menjadi 97% dan persentase tersebut dapat bertahan hingga 100 jam [28]. Secara keseluruhan, dekomposisi amonia dengan katalis paduan Ru dan oksida LTJ pada rentang suhu 400–475°C menunjukkan persentase konversi yang tinggi, yakni lebih dari 50%, sedangkan dekomposisi amonia dengan suhu 350°C menunjukkan persentase konversi yang lebih rendah, yakni kurang dari 50%. Laju produksi hidrogen juga meningkat seiring dengan peningkatan suhu. Suhu yang tinggi menyebabkan peningkatan energi kinetik dan membuat partikel bergerak lebih cepat [30]. Hasil laju produksi hidrogen terbesar ditunjukkan oleh katalis Ru/Y₂O₃, yakni 30,0 mol g⁻¹min⁻¹ pada suhu 475°C, kemudian disusul oleh Ru/Sm₂O₃, Ru/CeO₂, Ru/Pr₆O₁₁, Ru/La₂O₃ pada suhu 450°C.

Perbedaan berbagai jenis oksida LTJ berpengaruh terhadap efektivitas katalis Ru/LTJ yang tentunya juga mempengaruhi persentase konversi NH₃ dan laju produksi hidrogen. Secara umum, reaktivitas oksida LTJ meningkat dari Lantanum ke Europium, tetapi turun drastis seiring dengan penurunan ukuran kation. Hal tersebut berkaitan dengan kontraksi lantanida yang menjadikan oksida LTJ mempunyai aktivitas katalitik yang unik [31]. Efektivitas suatu katalis oksida juga bergantung pada keasaman

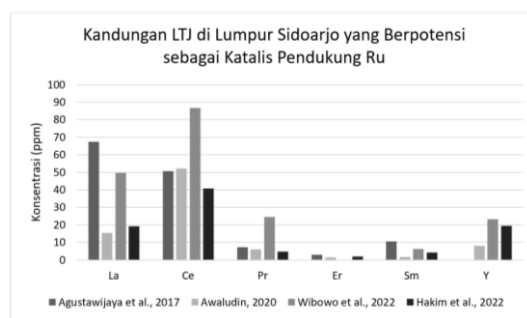
permukaan. Keasaman oksida LTJ meningkat sepanjang periode dari Lantanum ke Lutesium. Peningkatan keasaman berkaitan dengan kontraksi jari-jari dan muatan atom. Semakin kecil jari-jari dan semakin besar muatan atomnya, maka keasaman akan semakin meningkat. Begitu pula sebaliknya, semakin besar jari-jari dan semakin kecil muatan atomnya, maka keasaman menurun (semakin basa). Kation bermuatan tinggi dan ukuran kecil dapat menstabilkan deprotonasi oksianion melalui interaksi ikatan σ - dan π , sedangkan kation dengan muatan lebih rendah dan ukuran lebih besar tidak terpolarisasi ke arah oksianion. Hal tersebut secara efektif meningkatkan kebasaaan oksianion sehingga oksida LTJ mempunyai kemampuan lebih kuat untuk berikatan dengan proton di permukaan [20].

Urutan efektivitas berdasarkan katalis yang dirangkum pada Tabel 4 dan kaitannya secara teoritis adalah $Ru/La_2O_3 > Ru/CeO_2 > Ru/Pr_6O_{11} > Ru/Sm_2O_3 > Ru/Er_2O_3 > Ru/Y_2O_3$. Pada suhu yang sama, yakni $450^\circ C$, urutan efektivitas katalis sudah sesuai secara teoritis, yakni $Ru/La_2O_3 > Ru/Pr_6O_{11} > Ru/Sm_2O_3 > Ru/Er_2O_3$. Katalis Ru/CeO_2 seharusnya menempati urutan kedua dalam urutan tersebut, tetapi karena suhu reaksinya lebih rendah, maka persentase konversi NH_3 yang dihasilkan juga lebih rendah. Begitu pula dengan Ru/Y_2O_3 yang seharusnya menempati urutan terakhir. Akan tetapi, karena prosesnya bereaksi dengan suhu lebih tinggi, yakni $475^\circ C$, maka katalis tersebut dapat mengkonversi amonia dengan persentase konversi paling tinggi dibandingkan dengan katalis lain dalam kajian ini. Beberapa faktor lain yang juga mempengaruhi hasil dekomposisi amonia, diantaranya berat Ru (%wt), rasio antara Ru dan katalis pendukung, dan aliran NH_3 masuk (%) [6].

Aktivitas katalitik oksida LTJ juga ditunjukkan oleh kekosongan pada orbital 4f dan interaksinya dengan logam mulia. Keberadaan orbital 4f non-ikatan yang kosong pada oksida LTJ (kecuali Lutesium) dapat mempromosikan konversi logam mulia bermuatan netral menjadi bermuatan $\delta+$ dan selanjutnya mengaktifkan proses adsorpsi reaktan. Logam mulia bermuatan $\delta+$ dapat dikombinasikan dengan kekosongan oksigen pada oksida LTJ sehingga menjadi sumber aktif untuk berbagai reaksi, termasuk dekomposisi amonia. Pembentukan dan eliminasi kekosongan oksigen pada oksida LTJ masing-masing terjadi melalui pelepasan dan penyimpanan oksigen. Oleh karena itu, kekosongan oksigen merupakan

parameter penting untuk menunjukkan spesi aktif dari katalis oksida LTJ [33].

Lumpur Sidoarjo mengandung jenis LTJ yang sama seperti LTJ yang telah diteliti sebagai pendukung katalis Ru dalam dekomposisi amonia, yakni La (15-50 ppm), Ce (41-87 ppm), Pr (5-24,5 ppm), Sm (2-10,5 ppm), Er (1,5-3 ppm), dan Y (8-23 ppm). Hal tersebut menjadikan kawasan Lumpur Sidoarjo berpotensi untuk dilakukan eksplorasi lebih lanjut dan dilakukan ekstraksi LTJ skala besar. Setelah itu, LTJ dapat digunakan sebagai katalis pendukung Ru dalam dekomposisi amonia untuk menghasilkan hidrogen sebagai bahan bakar terbarukan. Kandungan LTJ di Lumpur Sidoarjo yang berpotensi sebagai katalis pendukung Ru disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kandungan LTJ di Lumpur Sidoarjo yang Berpotensi sebagai Katalis Pendukung Ru

Meskipun telah diidentifikasi terdapat LTJ yang beragam, tetapi penelitian mengenai ekstraksi LTJ dari Lumpur Sidoarjo yang berpotensi sebagai katalis pendukung Ru, yaitu La, Ce, Pr, Sm, Er, dan Y belum dilakukan. Implementasi ide kajian ini harus dimulai dari penelitian ekstraksi LTJ tersebut, kemudian berlanjut ke pemanfaatannya sebagai katalis pendukung Ru dalam dekomposisi amonia.

Indonesia memiliki industri-industri yang menghasilkan amonia sebagai produk samping, seperti industri kertas, karet, penyamakan kulit, dan mayoritas amonia dihasilkan oleh industri pupuk urea. Salah satu industri pupuk urea di Gresik setiap tahunnya rata-rata memproduksi lebih dari 900.000-ton urea [34]. Larutan urea sebelum dipurifikasi mengandung residu ammonium karbamat dan amonia berlebih yang dapat dipisahkan menjadi gas dengan cara pemanasan dan penurunan tekanan. Setelah dipurifikasi, urea masih mengandung sisa amonia sebesar 0,4% berat yang dapat dipisahkan pada proses pemekatan [35]. Banyaknya pupuk urea yang diproduksi pabrik tersebut menjadikan

limbah amonia yang dihasilkan diprediksi juga semakin banyak. Terlebih lagi, jika jumlah tersebut digabung dengan 9 pabrik besar penghasil pupuk urea di Indonesia, maka semakin banyak amonia yang diperoleh. Jika ditinjau dari kajian ini, amonia dapat dimanfaatkan sebagai media penyimpanan hidrogen untuk menghasilkan bahan bakar terbarukan sehingga menjadikan Indonesia negara yang mandiri energi.

Inovasi ini juga berpotensi membuka lapangan kerja baru bagi masyarakat Indonesia. Contohnya seperti untuk mengekstraksi LTJ dari lumpur, akan dibuka pabrik ekstraksi logam-logam utama, seperti Fe, Si, dan Al. Setelah itu, baru dibuka pabrik ekstraksi LTJ untuk mengolah hasil samping dari pabrik Fe, Si, dan Al sehingga diperoleh LTJ murni. Lapangan pekerjaan lain, seperti pabrik katalis, pabrik hidrogen berbasis dekomposisi amonia, dan pabrik sel bahan bakar hidrogen juga berpeluang tinggi untuk dibuka ketika inovasi ini direalisasikan. Dengan demikian, perekonomian Indonesia semakin meningkat dan menjadikan Indonesia sebagai negara maju dengan memanfaatkan Lumpur Sidoarjo yang selama ini dianggap musibah menjadi sumber perekonomian bangsa.

KESIMPULAN

Berdasarkan studi pustaka yang telah dilakukan, dapat disimpulkan:

- (1) LTJ yang terdapat di Lumpur Sidoarjo meliputi Sc, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, dan Y yang dapat diekstraksi menjadi bentuk oksida menggunakan metode hidrometalurgi;
- (2) Oksida-oksida LTJ yang berpotensi sebagai pendukung katalis Ru dan mampu mengkonversi NH_3 menjadi H_2 hingga 100% pada rentang suhu 400-475°C dan tekanan normal, meliputi CeO_2 , La_2O_3 , Er_2O_3 , Y_2O_3 , Sm_2O_3 , Pr_6O_{11} ;
- (3) Lumpur Sidoarjo mengandung jenis LTJ yang sama seperti LTJ yang telah diteliti sebagai pendukung katalis Ru dalam dekomposisi amonia untuk produksi hidrogen, yakni La (15-50 ppm), Ce (41-87 ppm), Pr (5-24,5 ppm), Sm (2-10,5 ppm), Er (1,5-3 ppm), dan Y (8-23 ppm).

Selain itu juga diperoleh beberapa informasi dan data, antara lain:

1. Dekomposisi amonia menjadi hidrogen dengan bantuan katalis Ru/LTJ mengikuti mekanisme Langmuir-Hinshelwood.

Hidrogen hasil dekomposisi tersebut dapat dimurnikan dengan beberapa metode, seperti PSA, distilasi kriogenik, atau membran selektif hidrogen agar menghasilkan hidrogen dengan kemurnian tinggi hingga 99,99% sehingga layak digunakan dalam energi terbarukan.

2. LTJ dalam bentuk oksida telah diuji sebagai katalis pendukung logam Ru dalam dekomposisi amonia untuk menghasilkan hidrogen. Katalis yang mempunyai efektivitas tinggi diperoleh ketika suhu reaksi 450°C, dengan urutan efektivitas $\text{Ru/La}_2\text{O}_3 > \text{Ru/Pr}_6\text{O}_{11} > \text{Ru/Sm}_2\text{O}_3 > \text{Ru/Er}_2\text{O}_3$ yang menghasilkan konversi amonia lebih dari 50%, sedangkan pada suhu 350°C yaitu Ru/CeO_2 , konversi amonia yang dihasilkan lebih rendah, yakni kurang dari 50%. $\text{Ru/Y}_2\text{O}_3$ pada suhu 475°C merupakan katalis terbaik karena dapat mengkonversi amonia dengan persentase 100% dan menghasilkan laju produksi hidrogen sebesar $30,0 \text{ mol g}^{-1} \text{ min}^{-1}$. Seluruh LTJ tersebut dapat ditemukan di Lumpur Sidoarjo sehingga produksinya berkelanjutan, mengingat hingga 2023, Lumpur Sidoarjo terus menghasilkan semburan lumpur.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami ucapkan kepada dosen pembimbing kami yaitu Bapak Yuniar Ponco Prananto, PhD dan pihak Departemen Kimia, Fakultas MIPA, Universitas Brawijaya atas masukan dan kesempatannya untuk mempublikasikan kajian ini. Penulis juga menyatakan tidak mempunyai konflik kepentingan dalam penulisan maupun publikasi ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. International Energy Agency. 2023. *CO₂ Emissions in 2022*. IEA Publications. Paris.
- [2]. Wahyudi, Jatmiko. 2016. Mitigasi Emisi Gas Rumah Kaca. *Jurnal Media Informasi Penelitian, Pengembangan, dan IPTEK*. 12. 2: 104-112.
- [3]. Massarwh, O., Al-khuzaei, M., Al-Shafi, M., et al. 2023. Blue hydrogen production from natural gas reservoirs: A review of application and feasibility. *Journal of CO₂ Utilization*. 70. 102438.
- [4]. Tawalbeh, M., Murtaza, S. Z. M., Al-Othman, A., et al. 2022. Ammonia: A versatile candidate for the use in energy storage systems. *Renewable Energy*. 194: 955-977.

- [5]. Statista. 2022. *Ammonia production worldwide in 2021, by country*. Available: <https://www.statista.com/statistics/1266244/global-ammonia-production-by-country/>. [Accessed 28 January 2023].
- [6]. Sun, S., Jiang, Q., Zhao, D., et al. 2022. Ammonia as hydrogen carrier: Advances in ammonia decomposition catalysts for promising hydrogen production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 19. 112918.
- [7]. Hossain, M. K., Rubel, M. H. K., Akbar, M. A., et al. 2022. A review on recent applications and future prospects of rare earth oxides in corrosion and thermal barrier coatings, catalysts, tribological, and environmental sectors. *Ceramics International*. 48. 22: 32588-32612.
- [8]. Lamb, K. E., Dolan, M. D., Kennedy, D. F. 2019. Ammonia for hydrogen storage: A review of catalytic ammonia decomposition and hydrogen separation and purification. *International Journal of Hydrogen Energy*. 44. 7: 3580-3593.
- [9]. Wijayanta, A. T., Oda, T., Purnomo, C. W., et al. 2019. Liquid hydrogen, methylcyclohexane, and ammonia as potential hydrogen storage: Comparison review. *International Journal of Hydrogen Energy*. 44. 29: 15026-15044.
- [10]. Armenise, S., Bordejé, E. G., Valverde, J. L., et al. 2013. A Langmuir–Hinshelwood approach to the kinetic modeling of catalytic ammonia decomposition in an integral reactor. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 15: 12104-12117.
- [11]. Sinha, P. and Padhiyar N. 2019. Optimal startup operation of a pressure swing adsorption. *IFAC-PapersOnLine*. 52. 1: 130-135.
- [12]. Hassan, T. N. A. T., Shariff, A., Pauzi, M. M. M., et al. 2022. Insights on Cryogenic Distillation Technology for Simultaneous CO₂ and H₂S Removal for Sour Gas Fields. *Molecules*. 27. 4.
- [13]. Sazali, N., Mohamed, M. A., and Salleh, W. N. W. 2020. Membranes for hydrogen separation: a significant review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 107: 1859-1881.
- [14]. Shofwan, M., and Agustina, R. Pola Sebaran Permukiman Terdampak Lumpur Lapindo Sidoarjo. *Compact: Spatial Development Journal*. 2. 1: 1-9.
- [15]. Rokhim, D. A., Islamiyah, K. K., and Sanjaya, E. H. 2022. A Review: Analysis of Metal and Mineral Content in the Complexity of Sidoarjo Hot Mud as a Source of Renewable Energy in Indonesia. *Journal of the Turkish Chemical Society*. 9. 4: 1255-1262.
- [16]. Agustawijaya, D. S., Karyadi, K., Krisnayanti, B. D., et al. 2017. Rare earth element contents of the Lusi mud: An attempt to identify the environmental origin of the hot mudflow in East Java – Indonesia. *Open Geoscience*. 9: 689-706.
- [17]. Awaludin, M. 2020. *Kandungan Mineral Ekonomis pada Lumpur Sidoarjo: Potensi dan Peluang Pemanfaatannya*. Badan Geologi Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Surabaya.
- [18]. Wibowo, H. T., Pratisho, B., Prasetyadi, C., et al. 2022. Potensi Unsur Tanah Jarang (Rare Earth Elements) Di Lumpur Panas Sidoarjo, Indonesia, dalam *Seminar Nasional Teknologi Industri Berkelanjutan II (SENASTITAN II)*, 19 Maret 2022, hlm. 533-539.
- [19]. Hakim, A. Y. A., Anggayana, K., Indriati, T., et al. 2022. Mineralogi dan Mobilitas Unsur pada Lithium dan Logam Tanah Jarang. *Jurnal GEOSAPTA*. 8. 2: 99-107.
- [20]. Indriawati, A., Aldila, H., dan Fabiani, V. A. 2020. Sintesis Oksida Logam Tanah Jarang Berbasis Pasir Monasit dengan Variasi pH. *Jurnal Sains dan Terapan Kimia*. 2. 2: 36-39.
- [21]. Rodliyah, I. dan Rochani, S. 2017. Pembuatan Logam Ytrium dengan Proses Metalotermik. *Jurnal Teknologi Mineral dan Batubara*. 13. 2: 125-139.
- [22]. Supriyanto, G., Khasanah, M., dan Darmokoesoemo, H. 2013. *Aplikasi Ionic Imprinting Polymer Untuk Isolasi Logam Scandium Yang Bernilai Ekonomi Tinggi Dari Lumpur Lapindo Sidoarjo Secara Ekstraksi Fasa Padat*. Universitas Airlangga. Surabaya.
- [23]. Hu, X. C., Fu, X. P., Wang, W. W., et al. 2020. Ceria-supported ruthenium clusters transform from isolated single atoms for hydrogen production via the decomposition of ammonia. *Applied Catalysis B: Environmental*. 118424.
- [24]. Javaid, R., Aoki, Y., Nanba, T., et al. 2020. Highly efficient Ru/MgO–Er₂O₃ catalysts for ammonia synthesis. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. 146. 109570.
- [25]. Huang, C., Yu, Y., Yang, Y., et al. 2019. Ru/La₂O₃ catalyst for ammonia

- decomposition to hydrogen. *Applied Surface Science*. 476.
- [26]. Nagaoka, K., Eboshi T., Abe, N., et al. 2014. Influence of basic dopants on the activity of Ru/Pr₆O₁₁ for hydrogen production by ammonia decomposition. *International Journal of Hydrogen Energy*. 39. 35: 20731-20735.
- [27]. Zhang, X., Liu, L., Feng, J., et al. 2021. Metal–support interaction-modulated catalytic activity of Ru nanoparticles on Sm₂O₃ for efficient ammonia decomposition. *Catalysis Science & Technology*. 11. 8: 2915–2923.
- [28]. Feng, J., Liu, L., Ju, X., et al. 2021. Highly Dispersed Ruthenium Nanoparticles on Y₂O₃ as Superior Catalyst for Ammonia Decomposition. *ChemCatChem*. 13. 6: 1552-1558.
- [29]. Hou, Z., Pei, W., Zhang X., et al. 2020. Rare earth oxides and their supported noble metals in application of environmental catalysis. *Journal of Rare Earths*. 38. 8: 819-839.
- [30]. Ojelade, O. A. and Zaman, S. F. 2021. Ammonia decomposition for hydrogen production: a thermodynamic study. *Chemical Papers*. 75: 57-65.
- [31]. Zheng, Z. 2012. *Lanthanide Oxide/Hydroxide Complexes*. p. 183-195 in *The Rare Earth Elements: Fundamental and Applications*. University of Kentucky. Lexington.
- [32]. Walrod, J. H. and Atwood, D. A. 2012. *Heterogeneous Catalysis*. p. 475-480 in *The Rare Earth Elements: Fundamental and Applications*. University of Kentucky. Lexington.
- [33]. Zhan, W., Guo, Y., Gong, X., et al. 2014. Current status and perspectives of rare earth catalytic materials and catalysis. *Chinese Journal of Catalysis*. 35. 8: 1238-1250.
- [34]. Petrokimia Gresik. 2021. *Annual Reports and Sustainability Reports*. PT. Petrokimia Gresik. Gresik.
- [35]. Bispo, A. S., Pessoa, F. L. P., and Souza, A. L.B. A. 2022. Brief Overview of Ammonia and Urea Production and Their Simulations Strategies. *Journal of Bioengineering, Technologies, and Health*. 5: 84-90.