

Studi Eksperimental Pengaruh *Steam to Carbon Ratio* 4:1 Terhadap Produksi Hidrogen Pada *Reformer* Melalui Proses *Steam Methane Reforming*

Putu Citta Maho¹, Made Sucipta¹, dan I Made Joni²

¹Jurusan Teknik Mesin Universitas Udayana, Kampus Bukit Jimbaran Bali

²Finder U-CoE- Universitas Padjadjaran, Jatinangor, Jawa Barat

Abstrak

Energi fosil masih menunjang aktivitas di berbagai sektor, tetapi hambatannya mendorong eksplorasi untuk menemukan energi alternatif berkelanjutan. Hidrogen (H_2) merupakan energi terbarukan yang memiliki banyak potensi dengan kelebihanannya. *Steam methane reforming* (SMR) merupakan teknologi penghasil H_2 yang dominan digunakan pada skala industri dengan dua tahapan proses, yaitu *reformer* dan *water gas shift* (WGS). *Steam to carbon ratio* (S/C) merupakan salah satu parameter penting dalam menentukan H_2 yang dihasilkan pada *reformer*. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh S/C terhadap produksi H_2 pada reaktor *reformer* dengan S/C 4:1, komposisi gas masukan 70% metana (CH_4) dan 30% karbondioksida (CO_2), katalis MgNi 30 gram, set temperatur 500°C, dan tekanan 1 atm. Hasil menunjukkan bahwa S/C 4:1 mampu mengonversikan CH_4 dan CO_2 masing-masing sebesar 70% dan 17,96% untuk menghasilkan H_2 , CO, dan sisa CO_2 masing-masing sebesar 43,82%, 44,14%, dan 12,04%. Hal tersebut menunjukkan peran S/C 4:1 yang mampu secara lebih baik dalam menggeser kesetimbangan reaksi menuju pembentukan produk berupa H_2 .

Kata kunci: *Steam methane reforming*, hidrogen, *steam to carbon ratio* (S/C)

Abstract

Fossil energy still supports activities in various sectors, but its constraints encourage exploration to find sustainable alternative energy. Hydrogen (H_2) is a renewable energy that has a lot of potential with its advantages. *Steam methane reforming* (SMR) is a dominant H_2 -producing technology used on an industrial scale with two process stages, namely *reformer* and *water gas shift* (WGS). *Steam to carbon ratio* (S/C) is one of the important parameters in determining the H_2 produced in the *reformer*. This study aims to determine the effect of S/C on H_2 production in a *reformer* reactor with S/C 4:1, input gas composition of 70% methane (CH_4) and 30% carbon dioxide (CO_2), 30 grams of MgNi catalyst, set temperature of 500°C, and pressure of 1 atm. The results show that the 4:1 S/C is able to convert CH_4 and CO_2 by 70% and 17.96% respectively to produce H_2 , CO, and residual CO_2 by 43.82%, 44.14%, and 12.04% respectively. This shows the role of S/C 4:1 which is able to better shift the reaction equilibrium towards the formation of products in the form of H_2 .

Keywords: *Steam methane reforming*, hydrogen, *steam to carbon ratio* (S/C)

1. Pendahuluan

Energi fosil yang bersifat tidak terbarukan (*unrenewable energy*) masih menopang berbagai aktivitas sektor di beberapa negara termasuk Indonesia [1]. Namun, penggunaan energi fosil secara berkelanjutan akan menyebabkan cadangan energi fosil semakin menipis apabila tidak ditemukan sumbernya [2]. Perlu adanya eksplorasi sumber energi terbarukan untuk memperoleh energi alternatif berkelanjutan yang mampu menggantikan peran energi fosil [3].

Hidrogen (H_2) merupakan salah satu energi terbarukan yang memiliki potensi melimpah sebagai energi berkelanjutan [4]. Hidrogen (H_2) memiliki beberapa kelebihan, yaitu ketersediaannya melimpah di alam, bebas polusi karbon, serta tingkat densitas energi yang tinggi sekitar 122 kJ/gr [5]. Hidrogen (H_2) diperoleh melalui beberapa teknologi, seperti *electrolysis*, *steam methane reforming* (SMR), dan *pyrolysis*. SMR sering digunakan untuk memproduksi hidrogen karena kelebihanannya, yaitu biaya yang murah, mampu menghasilkan hidrogen dengan

kemurnian tinggi, serta mampu menggunakan berbagai bahan baku termasuk metana (CH_4) [6].

Proses produksi H_2 melalui SMR terdiri atas dua tahapan, yaitu *reformer* dan *water gas shift* (WGS), serta tahapan tambahan untuk pemurnian hidrogen, seperti *pressure swing adsorption* (PSA) [7]. *Reformer* berperan dalam mereaksikan gas metana (CH_4) dengan *steam* (H_2O) secara endotermik untuk menghasilkan gas karbon monoksida (CO) dan H_2 [8]. Biogas yang telah dimurnikan dari kandungan gas pengotor hidrogen sulfida (H_2S) mampu digunakan sebagai bahan baku SMR karena kandungan dominan pada biogas adalah CH_4 [9]. WGS berperan dalam mereaksikan gas CO dengan *steam* secara eksotermik untuk menghasilkan gas H_2 dan karbon dioksida (CO_2) [10].

Kemampuan *reformer* dalam menghasilkan produk dipengaruhi oleh beberapa parameter, salah satunya adalah *steam to carbon ratio* (S/C) [3]. Peningkatan S/C akan menggeser kesetimbangan reaksi menuju pembentukan produk, sehingga H_2 yang diperoleh juga akan semakin banyak [10][11]. Selain itu, S/C secara efektif dapat mempengaruhi

peningkatan persentase konversi metana (CH_4) dan mengurangi endapan karbon dengan melalui proses gasifikasi karbon [13].

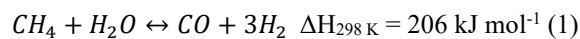
Pada penelitian ini, akan dilakukan kajian eksperimental penambahan S/C 4:1 menuju *reformer* dengan set temperatur 500°C , tekanan 1 atm, serta menggunakan katalis MgNi untuk menganalisis pengaruh S/C terhadap konsentrasi H_2 yang dihasilkan keluaran *reformer*.

Dalam hal ini maka ada permasalahan yang dikaji, yaitu pengaruh variasi S/C terhadap konsentrasi H_2 yang dihasilkan pada keluaran *reformer*.

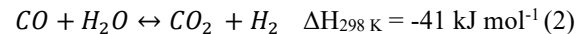
2. Dasar Teori

2.1 Steam Methane Reforming (SMR)

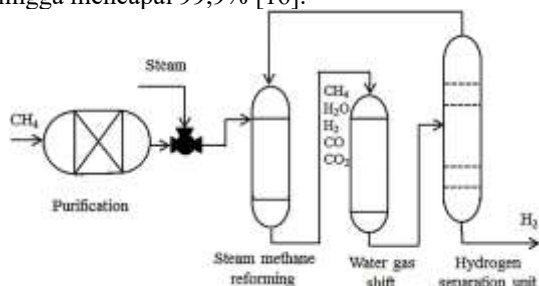
Teknologi SMR terdiri dari dua tahapan, yaitu *reformer* dan *water gas shift* (WGS) dengan tambahan unit separator yang umumnya digunakan adalah *pressure swing adsorption* (PSA) [14]. *Reformer* merupakan tahapan pertama dari SMR, di mana terjadi reaksi endotermis antara gas CH_4 dan *steam* dengan bantuan katalis menghasilkan syngas berupa CO dan H_2 pada temperatur $800\text{--}1000^\circ\text{C}$ dan tekanan 20-35 atm [15]. Reaksi yang terjadi pada *reformer* ditunjukkan melalui persamaan reaksi (1) sebagai berikut:



WGS merupakan tahapan kedua dari SMR, di mana terjadi reaksi eksotermis antara gas CO dan *steam* menjadi gas H_2 dan CO_2 dengan temperatur kerja berkisar antara $200\text{--}400^\circ\text{C}$ dan tekanan 10-15 atm [10], [15]. Reaksi yang terjadi pada WGS ditunjukkan melalui persamaan reaksi (2) sebagai berikut:



PSA merupakan teknologi tambahan pada proses SMR, di mana gas pengotor seperti CH_4 , CO_2 , dan CO akan ditangkap serta gas H_2 akan dimurnikan hingga mencapai 99,9% [16].



Gambar 1. Skema Proses Produksi Hidrogen Melalui SMR [17]

2.2 Parameter yang Mempengaruhi Reformer

2.2.1 Temperatur

Reaksi yang terjadi pada *reformer* merupakan reaksi endotermis, di mana reaksi tersebut memerlukan energi panas agar dapat menghasilkan produk [18]. Peningkatan nilai temperatur *reformer* akan meningkatkan konversi CH_4 dan hasil H_2 [19]. Peningkatan temperatur juga akan meningkatkan laju

reaksi pada sistem *reformer*, sehingga konsentrasi produk juga akan meningkat [11].

2.2.2 Tekanan

Peningkatan tekanan kerja pada *reformer* akan menurunkan nilai konversi CH_4 dan hasil H_2 [20]. Proses termodinamika *reformer* berada pada tekanan rendah karena akan meningkatkan nilai mol produk [21]. Hal tersebut berdasarkan prinsip Le Chatelier, *reformer* yang beroperasi pada tekanan rendah akan menyebabkan sistem untuk menyesuaikan perubahan dan membentuk kesetimbangan baru sehingga meningkatkan jumlah produk H_2 dan CO [11][21].

2.2.3 Katalis

Katalis berperan dalam meningkatkan laju reaksi secara proporsional tanpa mengubah titik keseimbangan. Katalis berbasis nikel (Ni) didukung dengan tambahan bahan berbasis aluminium (Al) dan magnesium (Mg) untuk membalik reaksi pembentukan karbon pada *reformer* [22][23]. Katalis berbasis Ni memiliki kelebihan yaitu harga yang relatif murah, ketersediaan yang melimpah, dan tingginya aktivitas katalitik [25].

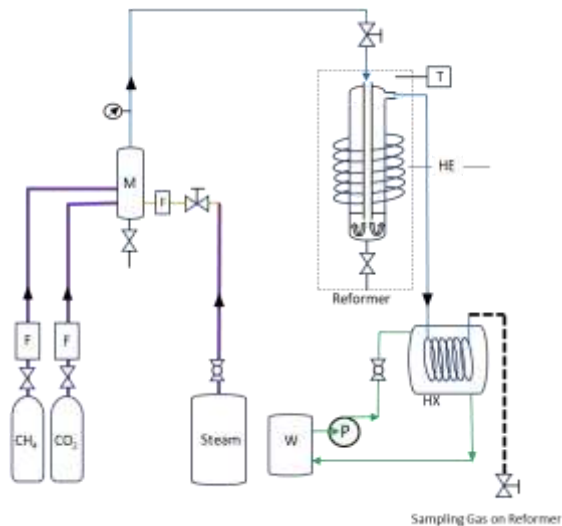
2.2.4 Steam to Carbon Ratio (S/C)

Steam to carbon ratio (S/C) adalah perbandingan nilai molar air (H_2O) dengan nilai molar karbon dari suatu zat. Peningkatan nilai S/C akan meningkatkan jumlah H_2O sebagai reaktan pada *reformer*, sehingga juga akan meningkatkan konversi CH_4 dan hasil H_2 [20]. Selain itu, Peningkatan nilai S/C lebih dari 2 pada SMR skala besar akan mengurangi temperatur dari reaksi terjadinya pembentukan karbon [26]. Rumus S/C dapat dijabarkan melalui persamaan (3) sebagai berikut:

$$S/C = \left[\frac{\dot{n}(\text{H}_2\text{O})}{\sum_{i=1}^N (X_i \cdot \dot{n}(\text{C}_{X_i}\text{H}_{Y_i}\text{O}_{Z_i}))} \right]_{\text{feed}} \quad (3)$$

3. Metode Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan secara eksperimental dalam skala laboratorium. Metode produksi H_2 dilaksanakan melalui penggabungan teknologi SMR dan PSA sebagai langkah tambahan dalam memurnikan gas H_2 . Proses penelitian dimulai dengan mengalirkan bahan baku biogas berupa gas CH_4 dan CO_2 serta *steam* menuju *mixer*. Gas masukan CH_4 , CO_2 , dan *steam* masing-masing diatur sebesar 70%, 30%, dan 150 ml/min menyesuaikan tetapan S/C 4:1. Gas campuran dari *mixer* akan dialirkan menuju reaktor *reformer* untuk direaksikan dengan bantuan katalis MgNi dalam keadaan set temperatur 500°C dan tekanan 1 atm. Hasil keluaran *reformer* akan dialirkan menuju *heat exchanger* dan dilakukan pengambilan sampling data untuk menganalisis konsentrasi masing-masing gas pada keluaran *reformer*. Gambar 2a dan 2b masing-masing menunjukkan skema penelitian dan alat-alat penelitian yang menjadi acuan proses penelitian.



(a) Skematik Alat Penelitian

Keterangan:

- : Primary channel
- : Water cooling channel
- : Hose
- : Steam pipe
- F : Flowmeter
- M : Mixer
- W : Water
- T : Thermocouple
- HX : Heat Exchanger
- HE : Heater



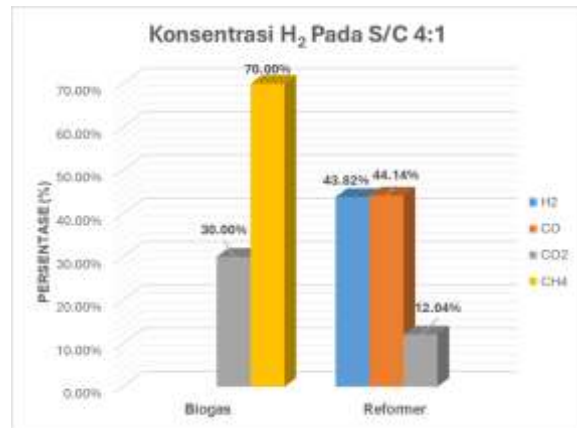
(b) Foto Peralatan

Gambar 2. Setup Alat Penelitian

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Pengaruh *Steam to Carbon Ratio* (S/C) Terhadap Konsentrasi Hidrogen Pada Keluaran Reformer

Berdasarkan hasil eksperimen penelitian yang telah dilaksanakan, maka diperoleh pengaruh S/C 4:1 terhadap konsentrasi H_2 keluaran reformer. Hasil tersebut ditunjukkan melalui gambar 4.1.



Gambar 3. Grafik Hubungan S/C 4:1 Terhadap Konsentrasi H_2 Keluaran Reformer

Berdasarkan grafik pada Gambar 3, menunjukkan adanya penurunan tren CH_4 dan CO_2 dari biogas menuju reformer dengan S/C 4:1. Penurunan nilai konversi CH_4 dari biogas menuju reformer sebesar 70% disertai dengan CO_2 sebesar 17,96%. Pengaruh S/C 4:1 menyebabkan steam yang masuk menuju reformer lebih dominan dibandingkan biogas, sehingga biogas lebih banyak terkonversi menjadi produk berupa CO dan H_2 . Hal tersebut didukung dengan diperolehnya gas H_2 dan CO masing-masing sebesar 43,82% dan 44,14% serta sisa CO_2 sebesar 12,04% seiring dengan penurunan tren perubahan biogas. Dengan demikian, tren penurunan CH_4 dan CO_2 serta hasil H_2 , CO , dan sisa CO_2 pada grafik menunjukkan bahwa S/C 4:1 mampu secara lebih baik dalam mereaksikan biogas dan steam untuk menghasilkan produk keluaran reformer.

2. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh S/C 4:1 terhadap produksi hidrogen keluaran reformer, diperoleh suatu kesimpulan sebagai berikut:

1. *Steam to carbon ratio* (S/C) 4:1 mampu secara lebih baik dalam menggeser kesetimbangan reaksi dari reaktan berupa biogas dan steam menuju produk berupa H_2 .

Daftar Pustaka

- [1] M. Nasution, "Bahan Bakar Merupakan Sumber Energi Yang Sangat Diperlukan Dalam Kehidupan Sehari Hari," *J. Electr. Technol.*, vol. 7, no. 1, hal. 29, Feb 2022.
- [2] Y. Afriyanti, H. Sasana, dan G. Jalunggono, "Analisis Faktor-faktor yang Mempengaruhi Konsumsi Energi Terbarukan di Indonesia," *Dinamic*, vol. 2, no. 3, hal. 865–884, 2020, doi: 10.31002/dinamic.v2i3.1428.
- [3] H. H. Faheem, H. U. Tanveer, S. Z. Abbas, dan F. Maqbool, "Comparative study of conventional steam-methane-reforming (SMR) and auto-thermal-reforming (ATR) with their hybrid sorption enhanced (SE-SMR & SE-ATR) and environmentally benign

- process models for the hydrogen production,” *Fuel*, vol. 297, Agu 2021, doi: 10.1016/j.fuel.2021.120769.
- [4] L. Cai, T. He, Y. Xiang, dan Y. Guan, “Study on the reaction pathways of steam methane reforming for H₂ production,” *Energy*, vol. 207, Sep 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118296.
- [5] R. H. Madon, M. Fawzi, K. I. Sarwani, S. A. Osman, M. A. Razali, dan A. W. Mohammad, “Effect of Steam to Carbon Ratio (S:C) on Steam Methane Reforming’s yield over Coated Nickel Aluminide (Ni₃Al) Catalyst in Micro Reactor,” *J. Kejuruter.*, vol. 32, no. 4, hal. 657–662, Nov 2020, doi: 10.17576/jkukm-2020-32(4)-14.
- [6] F. Abdulrahman, Q. Wang, F. Angikath, dan S. M. Sarathy, “Hydrogen sulfide methane reforming: A kinetic modeling and techno-economic analysis study,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 67, hal. 750–759, Mei 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.04.213.
- [7] H. Li, Z. Liao, J. Sun, B. Jiang, J. Wang, dan Y. Yang, “Modelling and simulation of two-bed PSA process for separating H₂ from methane steam reforming,” *Chinese J. Chem. Eng.*, vol. 27, no. 8, hal. 1870–1878, Agu 2019, doi: 10.1016/j.cjche.2018.11.022.
- [8] J. G. F. Madeira *et al.*, “Hydrogen production from swine manure biogas via steam reforming of methane (SRM) and water gas shift (WGS): A ecological, technical, and economic analysis,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 13, hal. 8961–8971, Feb 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2021.01.015.
- [9] A. Sri Komaladewi, “Pemurnian Biogas Dari Gas Pengotor Hidrogen Sulfida (H₂S) Dengan Memanfaatkan Limbah Geram Besi Proses Pembubutan Komang Metty Trisna Negara (1), Tjokorda Gde Tirta Nindhia (2)*, I Made Sucipta (3), I Ketut Adi Atmika (4), Dewa Ngakan Ketut Putra Negara (5), I Wayan Surata (6).”
- [10] T. E. Tolley dan B. M. Fronk, “Investigation of the benefits of diabatic microreactors for process intensification of the water-gas shift reaction within the steam reforming process,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 56, hal. 31507–31522, Nov 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.08.282.
- [11] K. Chen, Y. Zhao, W. Zhang, D. Feng, dan S. Sun, “The intrinsic kinetics of methane steam reforming over a nickel-based catalyst in a micro fluidized bed reaction system,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 3, hal. 1615–1628, Jan 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.11.080.
- [12] D. Pashchenko, “First law energy analysis of thermochemical waste-heat recuperation by steam methane reforming,” *Energy*, vol. 143, hal. 478–487, Jan 2018, doi: 10.1016/j.energy.2017.11.012.
- [13] Q. Zhao *et al.*, “Steam reforming of CH₄ at low temperature on Ni/ZrO₂ catalyst: Effect of H₂O/CH₄ ratio on carbon deposition,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 28, hal. 14281–14292, Mei 2020, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.03.112.
- [14] W. Shi, H. Yang, Y. Shen, Q. Fu, D. Zhang, dan B. Fu, “Two-stage PSA/VSA to produce H₂ with CO₂ capture via steam methane reforming (SMR),” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 41, hal. 19057–19074, Okt 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.08.077.
- [15] S. Z. Abbas, V. Dupont, dan T. Mahmud, “Kinetics study and modelling of steam methane reforming process over a NiO/Al₂O₃ catalyst in an adiabatic packed bed reactor,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 5, hal. 2889–2903, Feb 2017, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.11.093.
- [16] T. Oh dan S. Lee, “Optimization of steam-methane reforming process using PSA off gas,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 95, hal. 902–915, Des 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.11.149.
- [17] B. Beladjine, M. Djermouni, A. Sabeur, I. Belmehdi, dan M. El Ganaoui, “Steam Methane Reforming (SMR) Combined with Ship Based Carbon Capture (SBCC) for an Efficient Blue Hydrogen Production on Board Liquefied Natural Gas (LNG) Carriers,” *Fluid Dyn. Mater. Process.*, vol. 21, no. 1, hal. 71–85, 2025, doi: 10.32604/fdmp.2024.058510.
- [18] S. Alimah dan D. H. Salimy, “ANALISIS PASOKAN PANAS PADA PRODUKSI HIDROGEN PROSES STEAM REFORMING KONVENSIONAL DAN NUKLIR,” *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. 17, no. 1, hal. 11, Jun 2015, doi: 10.17146/jpen.2015.17.1.2614.
- [19] R. K. Dermawan, A. S. Sanjaya, R. Fathoni, A. Irawan, dan Y. Bindar, “PENGARUH KOMPOSISI MASSA BAHAN BAKU DAN TEMPERATUR PADA STEAM REFORMER TERHADAP JUMLAH PRODUKSI BIO-HYDROGEN PENGARUH KOMPOSISI MASSA BAHAN BAKU DAN TEMPERATUR PADA STEAM REFORMER TERHADAP JUMLAH PRODUKSI BIO-HYDROGEN,” *J. Chemurg.*, vol. 02, no. 1, 2018.
- [20] A. Antzara, E. Heracleous, D. B. Bukur, dan A. A. Lemonidou, “Thermodynamic analysis of hydrogen production via chemical looping steam methane reforming coupled with in situ CO₂ capture,” *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 32, hal. 115–128, Jan 2015, doi: 10.1016/j.ijggc.2014.11.010.

- [21] C. H. Kim *et al.*, “Hydrogen production by steam methane reforming in a membrane reactor equipped with a Pd composite membrane deposited on a porous stainless steel,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 15, hal. 7684–7692, Apr 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2017.11.176.
- [22] R. Carapellucci dan L. Giordano, “Steam, dry and autothermal methane reforming for hydrogen production: A thermodynamic equilibrium analysis,” *J. Power Sources*, vol. 469, Sep 2020, doi: 10.1016/j.jpowsour.2020.228391.
- [23] J. Han, Y. Zhu, L. Qin, W. Qin, dan B. Zhao, “Preparation of Ni-B/MgAl₂O₄ catalysts for hydrogen production via steam reforming of methane,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 78, hal. 353–362, Agu 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.06.317.
- [24] L. Turchetti *et al.*, “Kinetic assessment of Ni-based catalysts in low-temperature methane/biogas steam reforming,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 38, hal. 16865–16877, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.07.245.
- [25] G. Sorbino *et al.*, “Novel Ni–Ru/CeO₂ catalysts for low-temperature steam reforming of methane,” *Int. J. Hydrogen Energy*, Agu 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.07.385.
- [26] D. Pashchenko dan I. Makarov, “Carbon deposition in steam methane reforming over a Ni-based catalyst: Experimental and thermodynamic analysis,” *Energy*, vol. 222, Mei 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.119993.

	Putu Citta Maho menyelesaikan studi sarjana di Program Studi Teknik Mesin, Universitas Udayana dari tahun 2021 hingga 2025 dengan fokus utama pada bidang konversi energi
Bidang penelitian yang diminati adalah topik-topik yang berkaitan dengan <i>renewable energy</i>, khususnya produksi hidrogen yang ditekuni sebagai topik penelitian tugas akhir	