

EVALUASI POTENSI MAKROALGA SEBAGAI *RUMEN* MODIFIER PADA PAKAN KOMPLIT DOMBA BERDASARKAN PENDEKATAN TEKNOLOGI OMIK

DIMAR SARI WAHYUNI



**PROGRAM STUDI ILMU NUTRISI DAN PAKAN
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Evaluasi Potensi Makroalga sebagai *Rumen Modifier* pada Pakan Komplit Domba Berdasarkan Pendekatan Teknologi Omik” adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Juli 2026

Dimar Sari Wahyuni
NIM D2601221003

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



RINGKASAN

DIMAR SARI WAHYUNI. Evaluasi Potensi Makroalga sebagai *Rumen Modifier* pada Pakan Komplit Domba Berdasarkan Pendekatan Teknologi Omik. Dibimbing oleh ANURAGA JAYANEGARA, I. KOMANG GEDE WIRYAWAN dan RONI RIDWAN.

Peningkatan produktivitas ternak domba sebagai bagian dari upaya mendukung swasembada daging nasional berpotensi meningkatkan emisi gas rumah kaca, terutama metana enterik yang dihasilkan dari fermentasi rumen. Sistem peternakan rakyat yang masih didominasi oleh penggunaan hijauan berkualitas rendah menyebabkan fermentasi pakan tidak optimal, sehingga meningkatkan produksi metana. Selain itu, keterbatasan kandungan nutrisi dan rendahnya kualitas pakan berkontribusi terhadap rendahnya produktivitas ternak. Makroalga sebagai sumber daya hayati laut Indonesia yang kaya akan senyawa bioaktif memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai inovasi pakan bioaditif dalam sistem produksi ternak ruminansia. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi profil metabolit tidak tertarget rumput laut melalui pendekatan metabolomik, mengevaluasi potensi berbagai spesies makroalga Indonesia sebagai kandidat pakan aditif dalam memperbaiki profil rumen meliputi fermentasi dan pencernaan rumen secara *in vitro*, mengevaluasi pemberian pakan aditif makroalga yang mengandung senyawa bioaktif yang berpotensi sebagai *rumen modifier* dalam pakan komplit dan mendapatkan dosis optimal terbaik berdasarkan spesies dan perbedaan kandungan senyawa bioaktifnya sehingga dapat memperbaiki karakteristik fermentasi rumen dan pencernaan pakan serta mengurangi emisi gas metana enterik melalui pendekatan kajian secara *in vitro* dan teknologi omik (metabolomik dan metagenomik).

Penelitian ini dibagi dalam tiga tahap meliputi : 1) Eksplorasi, identifikasi dan produksi tepung makroalga dan pakan komplit yang terdiri dari 1.a.) Sampling beberapa spesies makroalga dari beberapa daerah di Indonesia, 1.b.) Produksi tepung makroalga, bahan pakan komplit dan proses ekstraksi makroalga, 1.c.) Identifikasi komposisi kimia makroalga dan bahan pakan komplit melalui analisis proksimat (kadar air, abu, protein kasar, lemak kasar, serat kasar, Bahan Ekstrak Tanpa Nitrogen (BETN), *Total Digestible Nutrient* (TDN), energi total, karbohidrat, energi dari lemak), dan serat pakan (*Neutral Detergent Fiber*, *Acid Detergent Fiber*, hemiselulosa, selulosa, lignin), kandungan asam lemak, asam amino, klorofil, mineral; 1.d.) Identifikasi dan karakterisasi metabolit primer dan sekunder pada beberapa spesies makroalga, 1.e.) Formulasi pakan komplit dan penentuan dosis pakan aditif tepung makroalga.

2) Pengujian *in vitro* tahap 1 (Identifikasi profil fermentasi dan pencernaan serta potensi penurunan produksi metana rumen 14 spesies tepung makroalga secara *in vitro*) dan pengujian *in vitro* tahap 2 (Evaluasi beberapa spesies makroalga terpilih pada pakan komplit terhadap fermentasi dan degradabilitas serta emisi metana enterik rumen *in vitro*). 3) Kajian metabolomik dan metagenomik yang terdiri dari 3.a.) Analisis metabolomik produk fermentasi rumen hasil pengujian *in vitro* tepung makroalga (metabolit tidak tertarget) dan analisis metagenomik profil mikrobiom rumen hasil pengujian *in vitro* pakan aditif tepung makroalga ke dalam pakan komplit.

Untuk tahap identifikasi dan karakterisasi metabolit primer dan sekunder pada beberapa spesies makroalga, rancangan acak lengkap dengan 14 perlakuan ekstrak makroalga dan 3 ulangan dilakukan untuk kandungan fenol dan flavonoid. *Caulerpa racemosa* memiliki kandungan flavonoid yang tinggi (1,5 mg Quercetin/g), dan *Ulva lactuca* memiliki kandungan fenol tertinggi (0,55 mg Asam Galat/g). Setiap sampel makroalga dikeringkan dengan cara dibekukan, digiling, dan diekstraksi menggunakan metanol dengan perbandingan 1:20 (berat/volume). Ekstrak dianalisis dengan kromatografi cair-spektrometri massa resolusi tinggi (LC-HRMS). Sebanyak 31 metabolit yang diduga telah diidentifikasi dan tersedia untuk penelitian lebih lanjut. *Pearson Correlation Analysis* (PCA) menunjukkan bahwa pemisahan makroalga tersebut dapat dijelaskan oleh variasi total sebesar 92,6%. Heatmap juga menampilkan profil metabolit di antara keempat spesies makroalga tersebut.

Pada percobaan kultur batch *in vitro* tahap 1, sebanyak 14 spesies makroalga yang digunakan meliputi *Sargassum* sp., *Palmaria palmata*, *Gelidium* sp., *Padina* sp., *Halymenia durvillei*, *Boergesenia forbesii*, *Gracilaria verrucosa*, *Eucheuma cottonii*, *Gracilaria gigas*, *Eucheuma spinosum*, *Ulva lactuca*, *Turbinaria ornata*, *Caulerpa racemosa*, dan *Gracilaria coronopifolia* dan diulang sebanyak 5 kali pengujian fermentabilitas dan pencernaan rumen *in vitro*. Pakan yang digunakan adalah 500 mg substrat makroalga yang diinkubasi dengan 50 ml campuran cairan rumen buffer (perbandingan 1:2 antara cairan rumen sapi Peranakan Ongole yang telah difistulasi dan larutan buffer) dalam tabung serum berukuran 100 ml pada suhu 39°C selama 72 jam. Rancangan acak lengkap diterapkan dengan 14 perlakuan tepung makroalga dan 5 ulangan. Data dianalisis menggunakan *Analysis of Variance* (ANOVA), diikuti dengan uji lanjut Duncan. Hasilnya menunjukkan bahwa produksi gas total tertinggi terdapat pada *B. forbesii* (54,75 mL; $p < 0,01$) dan terendah pada *T. ornata* (10,94 mL). Emisi metana terestimasi dan metana per bahan kering terestimasi yang diinkubasi terendah pada *Sargassum* sp. (1,87 mM dan 3,75 mM/g bahan kering; $p < 0,01$), dengan *Sargassum* sp. dan *C. racemosa* mengurangi metana terestimasi sebesar 71,86 %. Tingkat amonia seragam di antara spesies ($p > 0,05$). Total *Volatile Fatty Acid* (VFA) dan asam propionat paling tinggi pada *H. durvillei* dan *B. forbesii* ($p < 0,01$), dengan rasio asetat terhadap propionat yang lebih rendah. Pencernaan Bahan Kering (KCBK) dan Pencernaan Bahan Organik (KCBKO) paling tinggi pada *H. durvillei* (81,72 % dan 69,53 %; $p < 0,01$). Kinetika gas menunjukkan *B. forbesii* memiliki asimtot tertinggi (201,97 mL; $p < 0,01$) namun laju terendah (0,01 mL/jam).

Pengujian *in vitro* tahap 2 terdiri dari 10 perlakuan dan 5 ulangan meliputi R1 = 30% Rumput Gajah + 70% Konsentrat, R2 = R1 + 1% BK *Haliminea durvillei*, R3 = R1 + 2% BK *Haliminea durvillei*, R4 = R1 + 3% BK *Haliminea durvillei*, R5 : R1 + 1% BK *Caulerpa racemosa*, R6 : R1 + 2% BK *Caulerpa racemosa*, R7: R1 + 3% BK *Caulerpa racemosa*, R8 : R1 + 1% BK *Gracillaria gigas*, R9 : R1 + 2% BK *Gracillaria gigas*, R10: R1 + 3% BK *Gracillaria gigas*. Penelitian *in vitro* tahap 2 dengan menginkubasi substrat makroalga sebanyak 750 mg (30% rumput gajah dan 70% konsentrat) dalam 50 ml campuran cairan rumen dan larutanbuffer (rasio cairan rumen dan larutan penyangga sebesar 1:4) dalam 100 ml botol serum pada kondisi anaerob dan suhu 39°C selama 48 jam.

Rancangan percobaan yang digunakan adalah rancangan acak lengkap untuk perlakuan dengan kontrol dan rancangan acak lengkap faktorial untuk perlakuan tanpa kontrol, sebanyak 3 spesies makroalga dan dosisnya sebagai perlakuan dan 5 ulangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suplementasi berbagai spesies dan dosis makroalga pada pakan komplit memberikan pengaruh nyata terhadap produksi gas metana ($p < 0,05$; $p < 0,01$).



Perlakuan R8 (penambahan 1% BK *Gracilaria gigas*) menghasilkan produksi metana terendah secara konsisten pada hampir seluruh parameter, baik dalam satuan ppm (71.587,11), mL (8,72), mL/g BK (13,22), mL/g DBK (18,14), mL/g DBO (23,93), mM (2796,18), maupun rasio metan terhadap total gas (58,73 mL/L). Hasil penelitian menunjukkan bahwa suplementasi makroalga memberikan pengaruh yang sangat nyata ($p < 0,0001$) terhadap konsentrasi NH_3 dan total VFA dalam fermentasi rumen *in vitro*. Konsentrasi NH_3 dan VFA Total meningkat secara signifikan seiring dengan peningkatan dosis suplementasi, dengan nilai tertinggi pada perlakuan R9. Konsentrasi asetat cenderung meningkat dengan nilai tertinggi pada R9, sedangkan propionat relatif stabil di antara perlakuan ($p > 0,05$). Produksi asam butirat, valerat, dan asam lemak bercabang (isobutirat dan isovalerat) tidak berubah secara signifikan antar perlakuan. Rasio asetat terhadap propionat (A/P) sangat berbeda, dengan nilai tertinggi pada R10 dan nilai terendah pada R6.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa suplementasi makroalga berpengaruh sangat nyata ($p < 0,01$) terhadap sintesis protein mikroba (SPM), populasi protozoa, *partitioning factor* (PF), dan estimasi mikroba dalam fermentasi rumen *in vitro*. Nilai SPM meningkat secara signifikan dibandingkan kontrol, dengan nilai tertinggi pada perlakuan R9 dan R5. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suplementasi makroalga berpengaruh nyata hingga sangat nyata terhadap produksi gas total, baik dalam satuan mL/g bahan kering (BK) ($p < 0,01$) maupun volume total (mL) ($p < 0,001$). Produksi gas tertinggi diperoleh pada perlakuan R4. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suplementasi berbagai spesies makroalga pada berbagai dosis tidak memberikan pengaruh yang nyata terhadap nilai pH rumen ($p > 0,05$), dengan kisaran pH relatif stabil antara 6,77 hingga 6,91. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suplementasi makroalga memberikan pengaruh sangat nyata terhadap degradabilitas bahan kering (% DBK) ($p < 0,001$) dan berpengaruh nyata terhadap degradabilitas bahan organik (% DBO) ($p < 0,05$). Nilai % DBK dan % DBO tertinggi diperoleh pada perlakuan R9. Suplementasi makroalga pada fermentasi rumen *in vitro* mampu memodulasi komposisi dan keanekaragaman mikroba, mempengaruhi populasi arkea penghasil metana, serta mengubah profil metabolomik, PCA loading yang menggambarkan 131 metabolit dalam cairan rumen produk fermentasi *in vitro* rumen.

Kebaruan (kebaruan) dari penelitian ini terletak pada integrasi evaluasi fermentasi rumen secara *in vitro* dengan teknologi omik. Makroalga Indonesia berpotensi besar dikembangkan sebagai strategi inovatif untuk memperbaiki profil rumen meliputi fermentasi dan pencernaan rumen secara *in vitro*, meskipun penelitian lanjutan secara *in vivo* masih diperlukan untuk memastikan efektivitas dan dosis optimal dalam aplikasi praktis.

Kata kunci: degradabilitas dan pencernaan rumen, emisi metana enterik, profil fermentasi rumen, pendekatan teknologi omik, spesies makroalga

SUMMARY

DIMAR SARI WAHYUNI. Evaluation of the Potential of Macroalgae as *Rumen Modifiers* in Complete Feed of Sheep Using Omic Technology Approaches. Supervised by ANURAGA JAYANEGARA, I. KOMANG GEDE WIRYAWAN dan RONI RIDWAN.

Increasing sheep productivity as part of efforts to support national meat self-sufficiency has the potential to increase greenhouse gas emissions, particularly enteric methane produced by rumen fermentation. Smallholder farming systems, which are still dominated by the use of low-quality forage, result in suboptimal feed fermentation, thereby increasing methane production while reducing feed energy utilization efficiency. Furthermore, limited nutrient content and poor feed quality contribute to low livestock productivity. Macroalgae, a marine biological resource in Indonesia rich in bioactive compounds, hold great potential for use as innovative bioadditive feed in environmentally friendly and sustainable ruminant production systems.

This study aims to identify the untargeted metabolite profile of seaweed through a metabolomic approach, evaluate the potential of various Indonesian macroalgal species as feed additive candidates for improving rumen profiles, including rumen fermentation and digestibility in vitro, to evaluate the inclusion of macroalgal feed additives containing bioactive compounds with potential as rumen modifiers in complete feed, and to determine the optimal dosage based on species and differences in bioactive compound content, thereby improving rumen fermentation characteristics and feed digestibility while reducing enteric methane emissions through an in vitro study approach and omics technologies (metabolomics and metagenomics).

This research was divided into three phases, including :1) Exploration, identification, and production of macroalgae flour and complete feed, consisting of 1.a.) Sampling of several macroalgae species from various regions in Indonesia, 1.b.) Production of macroalgae flour, complete feed ingredients, and macroalgae extraction processes, 1.c.) Identification of the chemical composition of macroalgae and complete feed ingredients through proximate analysis (moisture content, ash, crude protein, crude fat, crude fiber, Non-Protein Extract (NPE), Total Digestible Nutrients (TDN), total energy, carbohydrates, energy from fat), and fiber of feed (Neutral Detergent Fiber, Acid Detergent Fiber, hemicellulose, cellulose, lignin), fatty acid content, amino acids, chlorophyll, and minerals; 1.d.) Identification and characterization of primary and secondary metabolites in several macroalgae species, 1.e.) Formulation of complete feed and determination of the dosage of macroalgae (seaweed) flour as a feed additive.

2) Phase 1 in vitro testing (in vitro identification of the profiles of 14 species of macroalgae flour and Phase 2 in vitro testing (in vitro evaluation of 3 species of macroalgae flour based on their dosage when supplemented into complete feed as a control). 3) Metabolomic and metagenomic studies consisting of 3.a.) Metabolic analysis rumen fermentation products from in vitro testing of macroalgae flour (non-targeted metabolites) and metagenomic analysis of the rumen microbiome profile from in vitro testing of macroalgae flour feed additives in complete feed.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



For the identification and characterization of primary and secondary metabolites in several macroalgal species, a completely randomized design with 14 macroalgal extract treatments and 3 replicates was conducted to determine phenolic and flavonoid content and antioxidant activity. *Caulerpa racemosa* had a high flavonoid content (1.5 mg quercetin/g), and *Ulva lactuca* had the highest phenolic content (0.55 mg gallic acid/g). Each macroalgal sample was freeze-dried, ground, and extracted using methanol at a 1:20 (weight/volume) ratio. The extracts were analyzed by High-Resolution Liquid Chromatography–Mass Spectrometry (LC-HRMS). A total of 31 putative metabolites were identified and are available for further research. Pearson Correlation Analysis (PCA) showed that the separation of these macroalgae can be explained by 92.6% of the total variation. A heatmap also displays the metabolite profiles among the four macroalgae species.

In the first phase of the in vitro batch culture experiment, a total of 14 macroalgal species were used, including *Sargassum* sp., *Palmaria palmata*, *Gelidium* sp., *Padina* sp., *Halymenia durvillei*, *Boergesenia forbesii*, *Gracilaria verrucosa*, *Eucheuma cottonii*, *Gracilaria gigas*, *Eucheuma spinosum*, *Ulva lactuca*, *Turbinaria ornata*, *Caulerpa racemosa*, and *Gracilaria coronopifolia*. Fermentability and in vitro rumen digestibility tests were repeated five times. In the first stage of the in vitro batch culture experiment, the feed used was 500 mg of macroalgae substrate incubated with 50 ml of a rumen buffer mixture (a 1:2 ratio of rumen fluid from fistulated Peranakan Ongole cattle and buffer solution) in 100-ml serum tubes at 39°C for 72 hours. A completely randomized design was applied with 14 macroalgal flour treatments and 5 replicates. Data were analyzed using Analysis of Variance (ANOVA), followed by Duncan's post-hoc test. The results showed that the highest total gas production was found in *B. forbesii* (54.75 mL; $p < 0.01$) and the lowest in *T. ornata* (10.94 mL). Estimated methane emissions and estimated methane per dry weight were lowest in *Sargassum* sp. (1.87 mM and 3.75 mM/g dry weight; $p < 0.01$), with *Sargassum* sp. and *C. racemosa* reducing estimated methane by 71.86%. Ammonia levels were uniform across species ($p > 0.05$). Total Volatile Fatty Acids (VFA) and propionate acid were highest in *H. durvillei* and *B. forbesii* ($p < 0.01$), with a lower acetate-to-propionate ratio. Dry Matter Digestibility (DMD) and Organic Matter Digestibility (OMD) were highest in *H. durvillei* (81.72% and 69.53% $p < 0.01$). Gas kinetics showed that *B. forbesii* had the highest asymptote (201.97 mL; $p < 0.01$) but the lowest rate (0.01 mL/h).

The second stage of the in vitro experiment consisted of 10 treatments with 5 replicates, namely: R1 = 30% Elephant Grass + 70% Concentrate, R2 = R1 + 1% DM *Halymenia durvillei*, R3 = R1 + 2% DM *Halymenia durvillei*, R4 = R1 + 3% DM *Halymenia durvillei*, R5 = R1 + 1% DM *Caulerpa racemosa*, R6 = R1 + 2% DM *Caulerpa racemosa*, R7 = R1 + 3% DM *Caulerpa racemosa*, R8 = R1 + 1% DM *Gracilaria gigas*, R9 = R1 + 2% DM *Gracilaria gigas*, and R10 = R1 + 3% DM *Gracilaria gigas*. Phase 2 in vitro study by incubating 750 mg of macroalgae substrate (seaweed) (30% elephant grass and 70% concentrate) in 50 mL of buffered rumen fluid (a 1:4 ratio of rumen fluid to buffer solution) in a 100-mL serum bottle under anaerobic conditions at 39°C for 48 hours.

The experimental design used was a completely randomized design for treatments with a control and a factorial completely randomized design for treatments without a control, with 3 macroalgal species and their doses as treatments and 5 replicates. The results of the study showed that the supplementation of various species and doses of macroalgae (seaweed) in complete feed had a significant effect on methane gas production ($p < 0.05$; $p < 0.01$). Treatment R8 (addition of 1% dry weight of *Gracilaria gigas*) consistently produced the lowest methane production across nearly all parameters, whether in ppm (71.587.11), mL (8.72), mL/g DM (13.22), mL/g DMD (18.14), mL/g OMD (23.93), mM (2796.18), or the ratio of methane to total gas (58.73 mL/L).

The results of the study indicate that macroalgae (seaweed) supplementation has a highly significant effect ($p < 0.0001$) on NH_3 and total VFA concentrations in *in vitro* rumen fermentation. NH_3 and total VFA concentrations increased significantly with increasing supplementation doses, reaching the highest values in treatment R9. Acetate concentration tended to increase, with the highest value in R9, while propionate remained relatively stable across treatments ($p > 0.05$). The production of butyrate, valerate, and branched-chain fatty acids (isobutyrate and isovalerate) did not change significantly between treatments. The acetate-to-propionate ratio (A/P) varied significantly, with the highest value in R10 and the lowest in R6.

The results of the study indicate that macroalgae (seaweed) supplementation has a highly significant effect ($p < 0.01$) on microbial protein synthesis (MPS), protozoa population, partitioning factor (PF), and microbial estimates in *in vitro* rumen fermentation. MPS values increased significantly compared to the control, with the highest values observed in treatments R9 and R5. The results indicate that macroalgae supplementation had a significant to highly significant effect on total gas production, both in units of mL/g dry matter (DM) ($p < 0.01$) and total volume (mL) ($p < 0.001$). The highest gas production was obtained in treatment R4. The results showed that supplementation with various macroalgae (seaweed) species at various doses did not have a significant effect on rumen pH ($p > 0.05$), with the pH range remaining relatively stable between 6.77 and 6.91. The results of the study showed that macroalgae (seaweed) supplementation had a highly significant effect on dry matter degradability (% DM) ($p < 0.001$) and a significant effect on organic matter degradability (% OM) ($p < 0.05$). The highest % DMD and % OMD values were obtained in treatment R9. Supplementation of macroalgae (seaweed) in *in vitro* rumen fermentation was able to modulate microbial composition and diversity, influence the population of methane-producing archaea, a PCA loading that illustrates the 131 metabolites in rumen fluid in fermenters incubated with the control R1 and addition with several macroalgae species and doses treatment (R2-R10).

The novelty of this study is that the integration of *in vitro* rumen fermentation evaluation with omics technology. Indonesian macroalgae (seaweed) have a great potential to be developed as an innovative and sustainable strategy to increase productivity and reduce enteric methane emissions from ruminant livestock, although further *in vivo* research is still needed to confirm effectiveness and optimal dosages for practical application.

Keywords: comparative macroalgae, enteric methane emission, *in vitro* rumen fermentation profile, rumen degradability and digestibility, omics technology approach

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

EVALUASI POTENSI MAKROALGA SEBAGAI *RUMEN* MODIFIER PADA PAKAN KOMPLIT DOMBA BERDASARKAN PENDEKATAN TEKNOLOGI OMIK

DIMAR SARI WAHYUNI

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Ilmu Nutrisi dan Pakan

**PROGRAM STUDI ILMU NUTRISI DAN PAKAN
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

IPB University

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Prof. Dr. Sri Suharti, S.Pt., M.Si.
- 2 Dr. Ir. RA Yeni Widiawati

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi::

- 1 Prof. Dr. Sri Suharti, S.Pt., M.Si.
- 2 Dr. Ir. RA Yeni Widiawati



Judul Disertasi : Evaluasi Potensi Makroalga sebagai *Rumen Modifier* pada Pakan Komplit Domba Berdasarkan Pendekatan Teknologi Omik

Nama : Dimar Sari Wahyuni
NIM : D2601221003

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Anuraga Jayanegara, S.Pt., M.Sc.

Pembimbing 2:
Prof. Dr. Ir. I. Komang Gede Wiryawan

Pembimbing 3:
Prof. Dr. Roni Ridwan, S.Pt., M.Si.



Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Ir. Dewi Apri Astuti, M.S.
NIP. 19611005 198503 2 001

Dekan Fakultas Peternakan :
Prof. Dr. Ir. Idat Galih Permana, M.Sc. Agr.
NIP. 19670506 199103 1 001



Tanggal Ujian Tertutup : 29 Juni 2026
Tanggal Sidang Promosi : 20 Juli 2026

Tanggal Lulus:



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala berkah, rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan disertasi. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan Juli 2022 sampai bulan September 2025 ini ialah Teknologi Nutrisi dan Pakan Aditif, dengan judul “Evaluasi Potensi Makroalga sebagai *Rumen Modifier* pada Pakan Komplit Domba Berdasarkan Pendekatan Teknologi Omik.”

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing (promotor) dari IPB University (Prof. Dr. Anuraga Jayanegara, S.Pt., M.Sc. dan Prof. Dr. Ir. I. Komang Gede Wiryawan) dan pembimbing dari Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) (Prof. Dr. Roni Ridwan, S.Pt., M.Si.) yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Rektor IPB University (Dr. Alim Setiawan Slamet, S.TP, M.Si), Dekan Sekolah Pascasarjana (Prof. Dr. Ir. Yusli Wardiatno, M.Sc.), Wakil Dekan Bidang Akademik, Kemahasiswaan dan Alumni (Prof. Dr. Ir. Yohanes Aris Purwanto, M.Sc.), dan Wakil Dekan Bidang Sumberdaya, Kerjasama dan Pengembangan (Perdinan, S.Si., M.Nat.Res.Econ., Ph.D.), Dekan Fakultas Peternakan (Prof. Dr. Ir. Idat Galih Permana, M.Sc. Agr.), Wakil Dekan Bidang Akademik dan Kemahasiswaan (Prof. Dr. Irma Isnafia Arief, S.Pt, M.Si) dan Wakil Dekan Bidang Sumberdaya, Kerjasama dan Pengembangan (Prof. Dr. agr. Asep Gunawan, S.Pt., M.Sc.), Ketua Program Studi S3 Ilmu Nutrisi dan Pakan (Prof. Dr. Dewi Apri Astuti, MS.) dan Sekretaris, Ketua Departemen Ilmu Nutrisi dan Teknologi Pakan, moderator kolokium (Dr. Ir. Rita Mutia., M.Agr), penguji luar komisi saat ujian kualifikasi doktor 1 (Prof. Ahmad Sofyan, S.Pt., M.Sc., Ph.D-BRIN), penguji luar komisi saat ujian kualifikasi doktor 2 dan moderator seminar (Dr. Indah Wijayanti, S.TP., M.Si) dan penguji luar komisi ujian tertutup dan terbuka 1 serta Direktur Sumber Daya Manusia IPB University yaitu (Prof. Dr. Sri Suharti, S.Pt., M.Si) dan penguji luar komisi ujian tertutup dan terbuka 2 (Dr. Ir. RA Yeni Widiawati). Seluruh staf pengajar dan tenaga pendidikan yang telah memberikan ilmu pengetahuan selama menempuh pendidikan doktor di Program Studi Ilmu Nutrisi dan Pakan.

Di samping itu, penghargaan penulis sampaikan kepada beberapa pejabat, professor dan staf Badan Riset dan Inovasi Nasional diantaranya Prof. Dr. Arif Satria, S.P., M.Si. (Kepala BRIN Periode 2025-sekarang) dan Dr. Laksana Tri Handoko, M.Sc. (Kepala BRIN Periode 2021-2025), Laksamana Madya TNI (Purn.) Prof. Dr. Ir. Amarulla Octavian, S.T., M.Sc., DESD., ASEAN Eng. (Wakil Kepala BRIN), Puji Lestari, S.P., M.Si., Ph.D. (Kepala Organisasi Riset Pertanian dan Pangan Periode 2021-sekarang), Dr. drh. Santoso., M.Si. (Kepala Pusat Riset Peternakan Periode Agustus 2024-sekarang), Ir. Tri Puji Priyatno, M.Agr.Sc. PhD. (Kepala Pusat Riset Peternakan Periode 2021-Juni 2024), dan Prof. Dr. drh. Herdis., M.Si. (Kepala Pusat Riset Peternakan Periode Juni-Agustus 2024) yang telah memberi izin penelitian selama menjabat.

Penulis mengungkapkan terima kasih juga kepada tim makroalga BRIN dan Perguruan Tinggi Negeri yang berperan dalam publikasi jurnal, paten, perjanjian kerja sama dengan industri swasta (Prof. Dr. Ir. Gunawan., MS., Prof. Ir. Arnold. Parlindungan Sinurat, M.S., Ph.D, Prof. Dr. Ir. Jacob Nulik., M.Sc, Prof. Dr. Ir. Nurjanah, M.S, Prof. Dr. Mohamad Rafi, S.Si., M.Si, Prof. Dr. Ir. Ali Agus, DAA., DEA., IPU., ASEAN Eng, Prof. Ir. Bambang Suwignyo, S.Pt., MP., Ph.D., IPM., ASEAN Eng., Prof. Dr. Ir. H. Iman Hernaman, M.Si., IPU, Prof. Dr. Ir. Osfar Sjoefjan, M.Sc., IPU., ASEAN Eng. dan kolega internasional lainnya).

Apresiasi penulis juga disampaikan kepada Prof. Dr. Ir. Lamhot Parulian Manalu, M.Si., Prof. Ir. Himawan Adinegoro, M.Sc., Prof. Dr. Ir. Soni Solistia Wirawan, M.Eng, Prof. Dr. Sri Widowati, MApp.Sc., Prof. Dr. Heny Herawati, STP., MT., beberapa Staf Pusat Riset Peternakan, Pusat Riset Pusat Riset Zoologi Terapan, Pusat Riset Bahan Baku Farmasi dan Obat Tradisional, Pusat Riset Budidaya Laut, Pusat Riset Budidaya Air Tawar, Pusat Riset Teknologi Proses, Pusat Riset Teknologi Manufaktur Peralatan Bogor, Indonesia BRIN lainnya dan Universitas Teuku Umar Aceh yang telah membantu selama pengumpulan data, Presiden Direktur PT. Fenanza Putra Perkasa (Dr. drh. Isra H.M. Noor, M.M.) dan tim untuk rencana hilirisasi produk pakan aditif, Promovendus Program Studi Ilmu Nutrisi dan Pakan angkatan 2022, keluarga tercinta inti (suami dan anak), papa (Bambang Wahyudi, S.E.), mama (Nunik Guniarti, BSc), adik (Guntur Yudha Hindarto, S.E.), adik ipar, keponakan, serta seluruh keluarga besar papa dan mama yang telah memberikan dukungan, doa, cinta dan kasih sayang, serta yang terhormat kepada Prof. Dr. Eng. Eniya Listiani Dewi. B, Eng., M.Eng., IPU (Direktur Jenderal EBTKE-ESDM) yang pernah menjabat sebagai Deputi Bidang Teknologi Agroindustri dan Bioteknologi Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi pada Periode Tahun 2015-2018 yang menjadi tauladan dalam berkarier dan berprestasi. Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Juli 2026

Dimar Sari Wahyuni



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xxii
DAFTAR GAMBAR	xxiv
DAFTAR LAMPIRAN	xxv
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	4
1.4 Manfaat	5
1.5 Ruang Lingkup	5
1.6 Kebaruan (<i>novelty</i>)	7
1.7 Hipotesis	7
II TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Makroalga (Kandungan Nutrien dan Derivatnya)	8
2.2 Emisi Metana Enterik dan Metanogenesis	8
2.3 Makroalga sebagai <i>Rumen Modifier</i>	10
2.4 Degradabilitas dan Pencernaan Rumen	10
2.5 Profil Fermentasi Rumen	11
2.6 Metagenomik Hasil Fermentasi Rumen	12
2.7 Metabolomik Hasil Fermentasi Rumen	12
III METODE	14
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	14
3.2 Alat dan Bahan	14
3.3 Prosedur Kerja	16
3.3.1 Eksplorasi, Identifikasi dan Produksi Tepung Makroalga dan Pakan Komplit	16
3.3.1.a Sampling Beberapa Spesies Makroalga dari Beberapa Daerah di Indonesia	16
3.3.1.b Produksi Tepung Makroalga, Bahan Pakan Komplit dan Proses Ekstraksi Makroalga	17
Pengolahan dan Penyimpanan Sampel	17
Proses Ekstraksi Makroalga	18
3.3.1.c Analisis Proksimat Makroalga dan Bahan Pakan Komplit	18
3.3.1.d Analisis Fraksi Serat Makroalga dan Bahan Pakan Komplit	19
3.3.1.e Analisis Asam Lemak, Asam Amino, Klorofil dan Mineral Makroalga dan Bahan Pakan Komplit	19
3.3.1.f Identifikasi dan Karakterisasi Metabolit Primer dan Sekunder pada Beberapa Spesies Makroalga	19
Analisis Total Fenol dan Flavonoid	19
Analisis Data untuk uji total fenol dan flavonoid	20
Metabolomik Tidak Tertarget (Profiling Metabolit Primer dan Sekunder) Ekstrak Makroalga	20

Analisis Data untuk Metabolomik Tidak Tertarget Ekstrak Makroalga	21
3.3.1.g Formulasi Pakan Komplit dan Penentuan Dosis Suplementasi Tepung Makroalga sebagai Pakan Aditif	22
3.3.1.h Pengujian Fermentasi dan Kecernaan/Degradabilitas Rumen Secara <i>In Vitro</i> Makroalga	24
Pengujian <i>In Vitro</i> Tahap 1 : Analisis Fermentasi dan Kecernaan <i>In Vitro</i> 14 Spesies Tepung Makroalga	24
Pengukuran Produksi Gas dan Estimasi Metana	26
Pengukuran Nilai pH	26
Pengukuran VFA total dan VFA parsial (mM)	26
Pengukuran Konsentrasi N-NH ₃ (mM)	26
Perhitungan Faktor Partisi dan Estimasi Protein Mikroba	26
Perhitungan Kinetika Produksi Gas Total	27
Analisis Data untuk Pengujian <i>In Vitro</i> tahap 1	27
Pengujian <i>In Vitro</i> tahap 2 : Evaluasi Beberapa Spesies Makroalga Terpilih pada Pakan Komplit terhadap Fermentasi dan Degradabilitas serta Emisi Metana Enterik Rumen <i>In Vitro</i>	28
Pengukuran Nilai pH, Faktor Partisi dan Estimasi Protein Mikroba dan Perhitungan Estimasi Metan (CH ₄)	29
Pengukuran VFA Total dan VFA parsial (mM)	29
Pengukuran Konsentrasi N-NH ₃ (mM)	30
Pengukuran Produksi Gas Metana (CH ₄) <i>In Vitro</i>	30
Pengukuran Sintesis Protein Mikroba	30
Pengukuran Populasi Protozoa	31
Analisis Data untuk Pengujian <i>In Vitro</i> Tahap 2	32
3.3.1.i Kajian Metabolomik Dan Metagenomik Produk Fermentasi Rumen <i>In Vitro</i>	32
Analisis Metabolomik Produk Fermentasi Rumen <i>In Vitro</i> dan Analisis Datanya	32
Analisis Metagenomik Produk Fermentasi Rumen <i>In Vitro</i> dan Analisis Datanya	33
Ekstraksi DNA Genom	33
Sekuensing 16S Nanopore Long-Read	34
Pengolahan dan Analisis Data Sekuensing 16S Long-Read	34
Analisis Data Metagenomik Produk Fermentasi <i>In Vitro</i> Tahap 2	35

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	36
4.1	Identifikasi dan Karakterisasi Metabolit Primer dan Sekunder pada Beberapa Spesies Makroalga	36
4.1.1	Evaluasi Beberapa Spesies Makroalga terhadap Kandungan Fenol, Flavonoid dan Nutrien (Proksimat)	36
4.1.2	Metabolomik Tidak Tertarget (Profiling Metabolit Primer dan Sekunder) Ekstrak Makroalga	38
4.2	Pengujian Fermentasi dan Kecernaan/Degradabilitas Rumen secara <i>In Vitro</i> Makroalga	49
4.2.1	Analisis Fermentasi dan Kecernaan <i>In Vitro</i> 14 Spesies Tepung Makroalga	49
	Implikasi secara Keseluruhan Terhadap Pemilihan Spesies	50
	Produksi Metana Terestimasi dan Potensi Mitigasinya	51
	Mekanisme Inhibisi Metana dan Pengaruh Spesifik Spesies Makroalga	51
	Variasi Estimasi Penurunan Produksi Metana	53
	Nilai pH dan Kestabilan Fermentasi Rumen	54
	Konsentrasi Amonia (NH ₃) dan Sintesis Protein Mikroba	54
	Faktor Partisi dan Efisiensi Mikroba	56
	Dinamika Amonia dan Fraksi Protein	56
	Implikasi terhadap Nutrisi Ternak Ruminansia	57
	Produksi VFA dan Jalur Fermentasi Rumen	58
	Profil Produksi VFA Total Beberapa Spesies Makroalga	58
	Profil VFA dan Implikasinya terhadap Mitigasi Metana	60
	Polisakarida non Pati dan Manipulasi Hydrogen Sink	61
	Korelasi antara Produksi Metana dan Produksi Produk Akhir Fermentasi	61
	Profil VFA Berbagai Spesies Makroalga dan Pola Fermentasinya	63
	Justifikasi Mekanisme dan Implikasi	65
	Kecernaan dan Ketersediaan Nutrien pada Berbagai Spesies Makroalga	66
	Korelasi Komposisi Kimia dan Produksi Metana	68
	Faktor-faktor yang Berkontribusi terhadap Variabilitas Antar Spesies	70
	Kandungan Fitokimia dan Potensi Bioaktif	71
	Asam Lemak Tak Jenuh Ganda (PUFA) dan Mitigasi Metana	71
	Senyawa Bioaktif dan Mekanisme Pengurangan Metana	72
	Kinetika Produksi Gas Total	72
	Keterbatasan Penelitian dan Implikasi Praktis	76
4.2.2	Evaluasi Beberapa Spesies Makroalga Terpilih pada Pakan Komplit Terhadap Fermentasi dan Degradabilitas serta Emisi Metana Enterik Rumen <i>In Vitro</i>	77
4.2.2.1.	Efek Supplementasi Beberapa Spesies Makroalga pada Pakan Komplit terhadap Produksi Gas Total Rumen	77
4.2.2.2.	Efek Utama Supplementasi dan Interaksi Faktor Beberapa Spesies Makroalga pada Pakan Komplit terhadap Produksi Gas Total Rumen	79

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

4.2.2.3	Efek Suplementasi Beberapa Spesies Makroalga pada Pakan Komplit terhadap Produksi Gas Metan Enterik	82
4.2.2.4	Efek Utama Suplementasi dan Interaksi Faktor Beberapa Spesies Makroalga pada Pakan Komplit terhadap Produksi Gas Metan	84
4.2.2.5	Efek Suplementasi Beberapa Spesies Makroalga pada Pakan Komplit terhadap Produksi VFA Total dan Konsentrasi NH ₃	88
4.2.2.6	Efek Utama Suplementasi dan Interaksi Faktor Beberapa Spesies Makroalga pada Pakan Komplit terhadap Produksi VFA Total dan Konsentrasi NH ₃	90
4.2.2.7	Efek Suplementasi Beberapa Spesies Makroalga pada Pakan Komplit terhadap Produksi VFA Parsial dan Rasio Asetat/Propionat	92
4.2.2.8	Efek Utama Suplementasi dan Interaksi Faktor Beberapa Spesies Makroalga pada Pakan Komplit terhadap Produksi VFA Parsial dan Rasio Asetat/Propionat	95
4.2.2.9	Efek Suplementasi Beberapa Spesies Makroalga pada Pakan Komplit terhadap Degradabilitas Bahan Kering dan Bahan Organik serta Nilai pH	98
4.2.2.10	Efek Suplementasi Beberapa Spesies Makroalga pada Pakan Komplit terhadap Sintesis Protein Mikroba, Total Protozoa, Faktor Partisi, Produksi Gas Total, Estimasi Mikroba	102
4.2.2.11	Efek Utama Suplementasi dan Interaksi Faktor Beberapa Spesies Makroalga pada Pakan Komplit terhadap Sintesis Protein Mikroba, Total Protozoa, Faktor Partisi, Estimasi Mikroba	104
4.2.3	Kajian Metabolomik dan Metagenomik Produk Fermentasi dan Degradabilitas <i>In Vitro</i> Tahap 2	106
4.2.3.1	Metabolomik Tidak Tertarget Produk Fermentasi Rumen Hasil Pengujian <i>In Vitro</i> Tahap 2	106
4.2.3.2	Metagenomik Profil Mikrobiom Rumen Produk Fermentasi Rumen Hasil Pengujian <i>In Vitro</i> Tahap 2	112
4.3	Pembahasan umum	
4.3.1	Integrasi Hasil Fermentasi <i>in vitro</i> , Metabolomik, dan Metagenomik dalam Mekanisme Makroalga sebagai Rumen Modifier	124
V	SIMPULAN DAN SARAN	127
5.1	Simpulan	127
5.2	Saran	127
	DAFTAR PUSTAKA	129
	LAMPIRAN	140
	RWYAT HIDUP	192



DAFTAR TABEL

1	Beberapa spesies makroalga yang digunakan dalam penelitian beserta koordinat lokasi pengambilan sampel	16
2	Komposisi proksimat 14 spesies makroalga (% BK)	22
3	Komposisi proksimat dan fraksi serat rumput gajah dan konsentrat (% BK)	23
4	Formula dan komposisi proksimat serta fraksi serat pakan komplit (% BK)	24
5	Kandungan fenol dan flavonoid beberapa spesies makroalga	37
6	Profil metabolit hasil analisis LC-MS/MS ekstrak methanol empat spesies makroalga yaitu <i>Caulerpa racemosa</i> , <i>Gracilaria gigas</i> , <i>Halymenia durvillei</i> dan <i>Palmaria palmata</i> berdasarkan kelimpahan relatif (%)	39
7	Produksi gas total rumen <i>in vitro</i> dan emisi metana enterik beberapa spesies makroalga	50
8	Nilai pH rumen, konsentrasi amonia, dan faktor partisi beberapa spesies makroalga	55
9	Produksi VFA Total, VFA Parsial dan rasio asetat/propionat beberapa spesies makroalga	59
10	Kecernaan bahan kering dan bahan organik beberapa spesies makroalga	67
11	Produksi gas rumen <i>in vitro</i> pada beberapa spesies makroalga berdasarkan waktu inkubasi	73
12	Parameter produksi gas yang diperoleh dari berbagai spesies makroalga selama 72 jam inkubasi	75
13	Efek suplementasi beberapa spesies makroalga pada pakan komplit terhadap produksi gas total rumen	78
14	Efek utama suplementasi spesies dan dosis makroalga pada pakan komplit terhadap produksi gas total dan produksi gas total	80
15	Pengaruh interaksi spesies dan level suplementasi makroalga pada pakan komplit terhadap produksi gas total	81
16	Efek suplementasi beberapa spesies makroalga pada pakan komplit terhadap produksi gas metan enterik	83
17	Efek utama suplementasi spesies dan dosis makroalga pada pakan komplit terhadap metan	85
18	Pengaruh interaksi spesies dan level suplementasi makroalga pada pakan komplit terhadap emisi metan enterik dalam rumen	86
19	Efek suplementasi beberapa spesies makroalga pada pakan komplit terhadap produksi VFA Total dan konsentrasi NH ₃	89
20	Efek utama suplementasi beberapa spesies makroalga pada pakan komplit terhadap produksi VFA Total dan konsentrasi NH ₃	90
21	Pengaruh interaksi spesies dan level suplementasi makroalga pada pakan komplit terhadap produksi VFA Total dan konsentrasi NH ₃	91
22	Efek suplementasi beberapa spesies makroalga pada pakan komplit terhadap produksi VFA Total dan rasio asetat/proionat	93
23	Efek utama suplementasi beberapa spesies makroalga pada pakan komplit terhadap produksi VFA parsial dan rasio asetat/proionat	96

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

IPB University

24	Pengaruh interaksi spesies dan level suplementasi makroalga pada pakan komplit terhadap produksi VFA parsial dan rasio asetat/proionat	97
25	Efek suplementasi beberapa spesies makroalga pada pakan komplit terhadap degradabilitas bahan kering dan bahan organik serta nilai pH	98
26	Efek utama suplementasi beberapa spesies makroalga pada pakan terhadap degradabilitas bahan kering dan bahan organik serta nilai pH	100
27	Pengaruh interaksi spesies dan level suplementasi makroalga pada pakan komplit terhadap degradabilitas bahan kering dan bahan organik serta nilai pH	101
28	Efek suplementasi beberapa spesies makroalga pada pakan komplit terhadap sintesis protein mikroba, total protozoa, faktor partisi, estimasi mikroba	102
29	Efek utama suplementasi beberapa spesies makroalga pada pakan komplit terhadap sintesis protein mikroba, total protozoa, faktor partisi, estimasi mikroba	105
30	Pengaruh interaksi faktor beberapa spesies makroalga pada pakan komplit terhadap sintesis protein mikroba, total protozoa, faktor partisi, estimasi mikroba	106

DAFTAR GAMBAR

1	Skema kerangka pemikiran dan tahapan proses penelitian	6
2	Lokasi pengambilan sampel <i>Sargassum</i> sp. dan spesies makroalga lainnya yang digunakan dalam penelitian ini	17
3	Plot skor PCA dari empat sampel spesies makroalga, yaitu <i>Caulerpa racemosa</i> (CR), <i>Gracilaria gigas</i> (GG), <i>Halymenia durvillei</i> (HLMN), dan <i>Palmaria palmata</i> (PLM)	44
4	Hasil klasterisasi 4 spesies makroalga, yaitu <i>Caulerpa racemosa</i> (CR), <i>Gracilaria gigas</i> (GG), <i>Halymenia durvillei</i> (HLMN), dan <i>Palmaria palmata</i> (PLM) yang ditampilkan dalam bentuk heatmap	46
5	Penurunan estimasi produksi metana (mM) pada berbagai spesies makroalga	54
6	Korelasi antara rasio asetat/propionat dan produksi metana eneterik terestimasi (mM)	62
7	Perbandingan profil total asam lemak terbang (Total Volatile Fatty Acid/TVFA) (mM) pada berbagai spesies makroalga	63
8	Profil komparatif asam lemak volatil parsial (Short-Chain Fatty Acids/SCFA) (mM) pada berbagai spesies makroalga	64
9	Korelasi antara serat kasar (%) dan asam asetat (mM) pada berbagai spesies makroalga	69
10	Korelasi antara protein kasar (%) dan asam propionat (mM) pada berbagai spesies makroalga	70
11	Produksi gas kumulatif (ml/g BK) beberapa spesies makroalga selama periode inkubasi 72 jam	74
12	Persentase penurunan emisi metana enterik dari beberapa makroalga pada pakan komplit dibandingkan dengan perlakuan kontrol	88
13	Korelasi antara produksi metan enterik (mM) dan konsentrasi asetat (mM)	94
14	Grafik skor analisis komponen utama (PCA) metabolit produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>In Vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	107
15	Diagram PCA loading yang menggambarkan 131 metabolit produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	109
16	Karakterisasi klaster k-means 1 berdasarkan metabolit metabolit produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	111
17	Kelimpahan relatif 16 genus mikroba dominan (% dari total sekuens) pada komunitas mikroba produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	113
18	Kelimpahan relatif 13 filum mikroba dominan (% dari total sekuens) pada komunitas mikroba dalam produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>In Vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga.	115
19	Pohon filogenetik (phylogenetic tree) yang menunjukkan hubungan kekerabatan mikroba rumen berdasarkan <i>Amplicon Sequence Variants</i> (ASV) pada seluruh perlakuan.	117

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

20	Diagram venn komposisi mikroba dalam produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>In Vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	119
21	Komposisi taksonomi mikrobiota rumen pada perlakuan <i>Caulerpa racemosa</i> 3% bk (perlakuan r7) untuk produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga.	121
22	Heatmap yang menggambarkan komunitas mikroba rumen produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga.	123
23	Mekanisme kerja makroalga sebagai <i>rumen modifier</i> berdasarkan Integrasi hasil fermentasi <i>in vitro</i> dan teknologi omik	126

DAFTAR LAMPIRAN

1	Kandungan total fenol ekstrak beberapa jenis makroalga terpilih	141
2	Kandungan total flavonoid ekstrak beberapa jenis makroalga terpilih	141
3	Kandungan total klorofil dan karotenoid ekstrak beberapa jenis makroalga terpilih	142
4	Kandungan proksimat beberapa jenis makroalga <i>Palmaria palmata</i> dan <i>Gracilaria gigas</i>	143
5	Kandungan serat beberapa jenis makroalga <i>Palmaria palmata</i> dan <i>Gracilaria gigas</i>	143
6	Kandungan proksimat beberapa jenis makroalga <i>Halymenia durvillei</i> dan <i>Caulerpa racemosa</i>	144
7	Kandungan serat beberapa jenis makroalga <i>Halymenia durvillei</i> dan <i>Caulerpa racemosa</i>	145
8	Kandungan asam lemak makroalga <i>Caulerpa racemosa</i>	145
9	Kandungan asam lemak makroalga <i>Gracilaria gigas</i>	147
10	Kandungan asam amino rumput gajah	149
11	Kandungan asam amino konsentrat	150
12	Kandungan asam amino makroalga <i>Caulerpa racemosa</i>	151
13	Kandungan asam amino makroalga <i>Gracilaria gigas</i>	151
14	Kandungan asam amino makroalga <i>Palmaria palmata</i>	152
15	Kandungan asam amino makroalga <i>Halymenia durvillei</i>	153
16	Kandungan oksida mineral makroalga <i>Caulerpa racemosa</i> berdasarkan analisis XRF	154
17	Kandungan mineral makroalga <i>Caulerpa racemosa</i> berdasarkan analisis XRF	155
18	Kandungan oksida mineral makroalga <i>Gracilaria gigas</i> berdasarkan analisis XRF	157
19	Kandungan mineral makroalga <i>Gracilaria gigas</i> berdasarkan analisis XRF	159
20	Kandungan oksida mineral makroalga <i>Halymenia durvillei</i> berdasarkan analisis XRF	161
21	Kandungan mineral makroalga <i>Halymenia durvillei</i> berdasarkan analisis XRF	161
22	PCA biplot metabolit berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa	

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

spesies makroalga	164
23 Pasangan PCA metabolit berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	165
24 Plot scree metabolit rumen berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	166
25 Plot signifikansi metabolit rumen berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	167
26 Pasangan SPLS metabolit rumen berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	168
27 Nilai SPLS metabolit rumen berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	169
28 Distribusi konsentrasi metabolit rumen sebelum dan setelah normalisasi pada seluruh perlakuan pakan berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	170
29 Integrasi Self-Organizing Map dan Principal Component Analysis yang mengungkap pola pengelompokan metabolit dalam cairan rumen berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	171
30 Klasterisasi K-Means yang diintegrasikan dengan Principal Component Analysis (PCA) menggambarkan metabolit dalam cairan rumen berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	172
31 Biplot Partial Least Squares (PLS) dari metabolit dalam cairan rumen berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	173
32 Plot skor Partial Least Squares (PLS) dari metabolit dalam cairan rumen berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	174
33 Plot komponen berpasangan Partial Least Squares (PLS) dari metabolit dalam cairan rumen berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	175
34 Plot loading Partial Least Squares (PLS) dari metabolit dalam cairan rumen berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	176
35 Nilai Variable Importance in Projection (VIP) dari analisis Partial Least Squares (PLS) metabolit dalam cairan rumen berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	177
36 Analisis Variable Importance in Projection (VIP) pada Partial Least Squares (PLS) dari metabolit dalam cairan rumen berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang	

	disuplementasi beberapa spesies makroalga	178
37	Tingkat kesalahan klasifikasi Sparse PLS-DA dari metabolit dalam cairan rumen berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	177
38	Klasifikasi Random Forest dari metabolit dalam cairan rumen berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	179
39	Kepentingan variabel Random Forest berdasarkan penurunan rata-rata akurasi (Mean Decrease Accuracy) dari metabolit dalam cairan rumen berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	180
40	Random Forest pencilan (outlier) dari metabolit dalam cairan rumen berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	181
41	Analisis keragaman mikroflora rumen pada berbagai kategori pakan. Keanekaragaman alfa (indeks teramati, indeks Chao1, indeks ACE, Indeks Shannon, indeks Simpson, indeks InvSimpson, indeks Fisher	182
42	Analisis keragaman mikroflora rumen pada berbagai kategori pakan. Grafik analisis koordinat utama (PCoA) dari matriks jarak Bray-Curtis (PCoA1 vs PCoA2) untuk komunitas bakteri sampel rumen	183
43	Analisis keragaman mikroflora rumen pada berbagai kategori pakan. Grafik analisis koordinat utama (PCoA) dari matriks jarak Bray-Curtis (PCoA1 vs PCoA3)	184
44	Diagram venn komposisi mikrobiom berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	185
45	Diagram krona komposisi mikroba berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	186
46	Grafik <i>Non-metric Multidimensional Scaling</i> (NMDS) komposisi mikroba berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	189
47	Analisis komponen utama (PCA) – PC1 vs PC2 dari komunitas mikroba rumen berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	190
48	Analisis komponen utama (PCA) – PC1 vs PC3 dari komunitas mikroba rumen berdasarkan produk fermentasi rumen hasil pengujian <i>in vitro</i> pada pakan komplit yang disuplementasi beberapa spesies makroalga	191

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.