

Review Pengolahan Air Limbah Menggunakan Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) di Negara Berkembang

Widia Putri¹, Ansiha Nur^{2*}

^{1,2} Teknik Lingkungan, Universitas Andalas, 25175 Indonesia

*Corresponding author, e-mail: ansiha@eng.unand.ac.id

Received 15th June 2023; 1st Revision 21th June 2023; Accepted 30th June 2023

ABSTRAK

Reaktor Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) merupakan teknologi pengolahan air limbah dengan metode anaerobik yang telah diakui manfaatnya. Kelebihan reaktor UASB dibandingkan dengan metode anaerobik dan aerobik yang lain adalah pemanfaatan energi yang rendah dan ramah lingkungan, kebutuhan ruang yang minimal, dan biaya operasional serta pemeliharaan yang rendah. Beberapa parameter utama yang mempengaruhi proses pengolahan UASB antara lain parameter suhu, Hydraulic Retention Time (HRT), Organic Loading Rate (OLR), pH, granulasi, dan mixing. Salah satu produksi biogas yang dihasilkan dari pengolahan air limbah dengan reaktor UASB adalah hidrogen. Langkah-langkah posttreatment setelah pengolahan dengan reaktor UASB merupakan hal yang perlu diperhatikan agar kualitas effluen yang dihasilkan sesuai dengan standar yang berlaku.

Kata Kunci: UASB; Air Limbah; anaerobic; aerobik

ABSTRACT

The Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) Reactor is a wastewater treatment technology using an anaerobic method that has been recognized for its benefits. The advantages of the UASB reactor compared to other anaerobic and aerobic methods are low energy utilization and environmental friendliness, minimal space requirements, and low operational and maintenance costs. Some of the main parameters that affect the processing of UASB include temperature parameters, Hydraulic Retention Time (HRT), Organic Loading Rate (OLR), pH, granulation, and mixing. One of the production of biogas produced from wastewater treatment with a UASB reactor is hydrogen. The post-treatment steps after processing with the UASB reactor are things that need to be considered so that the quality of the effluent produced is in accordance with applicable standards.

Keywords: UASB; Wastewater; anaerobic; aerobics

Copyright © Widia Putri, Ansiha Nur

This is an open access article under the: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

PENDAHULUAN

Pengelolaan air limbah merupakan suatu tantangan yang berat yang harus dihadapi oleh negara-negara berkembang. Semakin meningkatnya pertumbuhan penduduk, tumbuh pesatnya industri, dan terjadinya urbanisasi menyebabkan volume limbah menjadi semakin meningkat yang dibuang ke lingkungan tanpa diolah terlebih dahulu karena kurang memadainya

infrastruktur untuk mengolah air limbah dengan benar [1]. Di negara-negara berkembang, hampir 90 % air limbah dibuang ke lingkungan tanpa diolah terlebih dahulu karena kurangnya infrastruktur untuk pengolahan limbah [2]. Air limbah yang tidak diolah masih mengandung kontaminan termasuk patogen yang sangat berbahaya untuk kesehatan manusia dan lingkungan ekosistem penerima. Namun terlepas adanya ancaman yang berbahaya, air limbah yang mengandung bahan organik bisa dimanfaatkan sebagai *recovery* sumber daya seperti kandungan nutrisi diolah menjadi kompos/pupuk, *recovery* energi yang menghasilkan biogas, serta air yang bisa digunakan kembali untuk irigasi [3]. Pemulihan sumber daya ini sangat penting untuk pengelolaan air limbah yang berkelanjutan dan memberikan efek yang sangat positif terhadap lingkungan.

Teknologi pengolahan limbah konvensional yang banyak diterapkan penggunaannya di negara-negara maju/negara berpendapatan tinggi tidak cocok jika diterapkan di negara-negara berpendapatan rendah/negara berkembang karena beberapa faktor, diantaranya adalah tingginya biaya pembangunan instalasi dan biaya operasional, meskipun effluen yang dihasilkan dari pengolahan tersebut sangat berkualitas [4]. Pengolahan air limbah secara biologis dengan sistem anaerobik merupakan alternatif pilihan yang cukup menjanjikan. Dibandingkan dengan pengolahan aerobik, pengolahan anaerobik memiliki banyak keuntungan diantaranya: (i) Konsumsi energi yang rendah bahkan tidak ada sama sekali, (ii) Operasionalnya yang sederhana, (iii) Mampu mengolah air limbah dengan beban organik yang tinggi (*high rate*), (iv) Pengolahan air limbah menghasilkan biogas yang bisa dimanfaatkan, (v) Tahan terhadap fluktuasi influen, dan (vi) Menghasilkan padatan dengan stabilisasi yang cukup [2].

Diantara berbagai pengolahan air limbah, pengolahan anaerobik Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) telah terbukti berhasil mengolah air limbah dan telah diterapkan pada berbagai pengolahan air limbah seperti pulp dan kertas, gula, produk susu, kacang, pemotongan hewan, produksi mie, kopi, dan lain sebagainya [5]. Pengolahan UASB dikembangkan oleh Lettinga dan rekan kerjanya pada akhir 1970-an [6].

Dibandingkan dengan teknologi aerobik, pengolahan anaerobik seperti UASB mempunyai beberapa keunggulan seperti: desain konstruksi dan pemeliharaan sederhana, kebutuhan lahan kecil, biaya konstruksi dan operasi rendah, produksi lumpur sedikit, kemampuan dalam penyisihan COD, kemampuan mengatasi fluktuasi suhu, *recovery* boimassa yang cepat, pembangkit energi dalam bentuk biogas atau hidrogen (Haandel, A. C. Van; Lettinga, 1994). Karakteristik yang menguntungkan ini akhirnya menjadikan UASB sebagai pilihan pengolahan air limbah yang populer dan sejumlah besar peneliti telah merekomendasikan teknologi UASB untuk pengolahan air limbah di daerah tropis dan subtropis. Penggunaan pengolahan dengan UASB ini sangat cocok di negara tropis dimana suhu sekitar relatif tinggi dan pertumbuhan bakteri metanogenik dan mesofilik menjadi optimal.

METODE

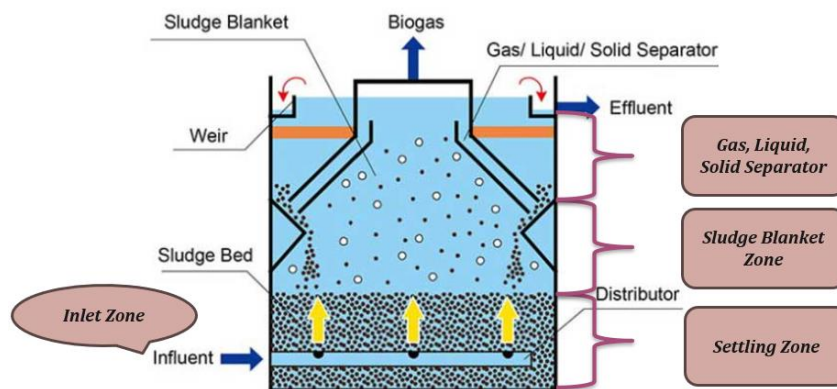
Metode penelitian yang digunakan berupa tinjauan literatur dengan topik pengolahan air limbah menggunakan *Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)*. Jurnal ditinjau melalui *Google Scholar* dengan prioritas terbitan beberapa tahun terakhir (2010-2020).

Dari beberapa jurnal yang telah dikaji, proses pengolahan air limbah diawali dengan masuknya air limbah pada reaktor UASB dari bawah dan mengalir ke atas, dan selanjutnya akan melalui proses pengolahan pada beberapa zona di dalam reaktor. Effluen yang dihasilkan diantaranya

adalah biogas berupa metana dan hidrogen yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi. Selain itu, effluen air limbah yang dihasilkan dari proses pengolahan reaktor UASB perlu dikaji lebih lanjut kandungan yang tersisa untuk menentukan *post-treatment* yang akan digunakan selanjutnya.

PRINSIP KERJA UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET (UASB)

Air limbah yang akan diolah masuk dari dasar reaktor dan dialirkan keatas melalui *sludge blanket* yang aktif. Stabilitas agregat lumpur yang baik akan menyebabkan efisiensi pengolahan yang juga baik. Gas-gas (Metana dan karbondioksida) yang dihasilkan selama proses pengolahan akan menyebabkan terjadinya pencampuran, sehingga hal tersebut dapat membantu pemeliharaan granular. Namun gas-gas yang dihasilkan akan melekat pada granular, dan *gas-liquid-solids separator (GLSS)* ditambahkan pada bagian atas reaktor untuk memisahkan gas, cairan, dan granular. Di dalam GLSS, partikel yang diselubungi oleh gas akan menghantam bagian bawah dari *baffle degassing* dan jatuh kembali ke *sludge blanket* dan air yang diolah akan mengalir keluar dari reaktor.



Gambar. 1. Zona dan komponen pada Reaktor *Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)*

Produksi gas yang lebih sedikit didalam pengolahan limbah dibanding kekuatan air limbah itu sendiri, akan menyebabkan sirkulasi gas yang lebih sedikit untuk mendukung pembentukan granular. Oleh karena itu perlu dilakukan kontrol pengaliran air limbah terutama untuk pengaliran air limbah yang lemah [6].

POTENSIAL PROSES PENGOLAHAN UASB

Teknologi UASB terbukti sangat efektif untuk mengolah air limbah dengan kandungan karbohidrat yang tinggi. Air limbah organik yang mengandung karbohidrat yang tinggi sangat mudah dicerna oleh mikroba sehingga hal tersebut merupakan langkah awal untuk memproduksi hidrogen secara anaerobik. Pada saat ini reaktor UASB merupakan desain yang cukup populer digunakan untuk pengolahan air limbah pada industri makanan [2].

Sekitar setengah kandungan bahan organik pada air limbah domestik disebabkan oleh limbah *blackwater* yang kaya akan nutrisi. Reaktor UASB *high rate* cukup populer dan telah digunakan cukup banyak karena kemampuannya mengolah air limbah dengan *OLR (Organic Loading Rate)* yang tinggi, *HRT (Hydraulic Retention Time)* yang rendah, dan kebutuhan energi yang rendah [8], [9]. Konsep dasar dari UASB ini adalah menghasilkan lumpur anaerobik yang memiliki karakteristik pengendapan yang baik dan dapat menahan agregasi bakteri yang sangat aktif tanpa menggunakan bantuan dari bahan lainnya [2]. Hampir 60 % pengolahan anaerobik

yang beroperasi di dunia menggunakan UASB, dan pengolahan tersebut digunakan untuk mengolah berbagai macam air limbah pada industri [10]. Sekitar 793 reaktor UASB dari total 1229 pengolahan secara anaerobik yang digunakan di seluruh dunia membuktikan penggunaan UASB yang sudah cukup banyak. Sedangkan setengah dari reaktor ini (338 dari 793) digunakan di negara beriklim tropis dan subtropis [11].

Tabel 3. Keuntungan dan Kelemahan Teknologi Reaktor UASB

Nomor		Referensi
	Keuntungan Reaktor UASB	
(1)	Efisiensi yang tinggi bahkan pada OLR yang tinggi pada suhu rendah sehingga hanya membutuhkan volume reaktor yang lebih kecil	[12]
(2)	Konstruksi yang sederhana dan rendahnya biaya operasional dan pemeliharaan, dan tersedianya bahan konstruksi lokal	[13]
(3)	Ketangguhan dalam efisiensi pengolahan dan penerapan yang luas dari skala yang sangat kecil hingga sangat besar	[14]
(4)	Energi yang dihasilkan yaitu berupa gas metana dan hidrogen dapat digunakan untuk memansakan boiler sehingga mengurangi biaya operasional	[15], [16]
(5)	Lebih sedikit emisi CO ₂ karena kebutuhan energi yang sedikit	[17]
(6)	Produksi lumpur yang dihasilkan lebih rendah dibandingkan proses aerobik	[18]
(7)	Mampu menahan beban kejut organik	[19]
(8)	Kemampuan untuk mengolah limbah karena terkandungnya nutrisi dan pH yang stabil tanpa penambahan zat kimia	[20], [21]
	Kelemahan Reaktor UASB	
(9)	Membutuhkan post-treatment/pasca pengolahan karena patogen yang tidak dapat dihilangkan sepenuhnya dan penyisihan nutrisi yang tidak maksimal	[22], [23]
(10)	Dibutuhkan waktu start up yang lama karena laju pertumbuhan mikroorganisme yang lambat, jika tidak dilakukan lumpur aktif akan melimpah	[2]
(11)	Bau, toksisitas, dan masalah korosi: H ₂ S yang dihasilkan selama proses anaerobik. Biogas perlu penanganan lebih lanjut untuk menghindari bau tak sedap	[22], [24]
(12)	Pada daerah dengan suhu yang dingin, suhu dipertahankan berkisar 15-35 ^o C untuk menjaga agar kinerja maksimal	[25]
(13)	Sebagian besar biogas yang dihasilkan dapat larut dalam effluen sehingga recovery sangat dibutuhkan	[25], [26]

POTENSI RECOVERY/PEMULIHAN SUMBER DAYA

Teknologi anaerobik memiliki kemampuan untuk *recovery* energi kimia karbon organik pada air limbah menjadi gas metana, hidrogen, dan listrik. Di dalam reaktor UASB padatan ditangkap dan bahan organik diubah menjadi biogas yang sebagian besar terdiri dari gas metan dan karbondioksida. Nitrogen yang terikat secara organik diubah menjadi amonium dan sulfat direduksi menjadi hidrogen sulfida. Pemulihan energi merupakan proses yang terjadi dalam

waktu yang cukup lama, dimana prosesnya terjadi karena produksi biofuel dari substrat yang kaya organik [27]. Dalam kasus air limbah, jika kandungan BOD < 300 mg/L (kekuatan rendah), maka pengolahan dengan proses aerobik lebih menguntungkan karena lebih sedikit menghasilkan efek rumah kaca. Namun jika kandungan BOD > 300 mg/L (kekuatan tinggi), maka pengolahan dengan proses anaerobik lebih menguntungkan.

Hidrogen yang dihasilkan pada proses anaerobik merupakan gas yang bebas karbon, dan dapat dijadikan sebagai pengganti bahan bakar fosil, serta secara ekonomi akan sangat menjanjikan di masa depan karena hasil energinya yang cukup tinggi (122 kJ/g) [2]. permasalahan utama pada produksi hidrogen melalui proses biologi adalah jumlah produksi hidrogen yang cukup rendah. Beberapa penelitian telah dilakukan untuk menghasilkan biohidrogen dari proses pengolahan limbah industri makanan, namun sangat sedikit penelitian yang dilakukan untuk menghasilkan hidrogen dari air limbah domestik. Potensi untuk memproduksi hidrogen saat ini dapat diwujudkan dengan pengolahan air limbah domestik menggunakan reaktor anaerobik [28], [29]. Fernandes dan kawan-kawan menyatakan bahwa hidrogen yang dapat dihasilkan dengan menggunakan limbah domestik sebagai substrat pada pengolahan dengan reaktor anaerobik adalah sekitar 200 ml H₂/g COD [28].

Untuk menghasilkan hidrogen, kondisi operasional memberikan pengaruh yang sangat penting. pH sekitar 5,0 – 5,5 mampu mendukung proses produksi hidrogen karena intermediet yang dihasilkan dalam reaktor dapat membentuk rasio yang sesuai untuk merangsang pertumbuhan mikroba yang bertanggungjawab untuk menghasilkan hidrogen. Beberapa faktor yang mempengaruhi produksi hidrogen adalah inokulum, suhu, *Organic Loading Rate (OLR)*, *Hydraulic Retention Time (HRT)*, dan pH. Suhu optimum untuk memproduksi hidrogen tergantung pada jenis bakteri penghasil hidrogen dan sumber karbon yang digunakan [30]. Bakteri penghasil hidrogen termasuk pada kelompok mesofilik dan termofilik dan pada umumnya laju produksi hidrogen meningkat seiring dengan kenaikan suhu pada bakteri termofilik dibandingkan bakteri mesofilik [31].

Mu dan Yu menyatakan bahwa hidrogen dapat diproduksi secara terus menerus dengan menggunakan reaktor UASB berbasis granular asidogenik pada berbagai konsentrasi substrat (5,33 – 28,07 g COD/L) dan pada HRT 3- 30 jam [32]. Laju produksi hidrogen akan meningkat seiring meningkatnya konsentrasi substrat, akan tetapi akan menurun jika HRT semakin meningkat yaitu sekitar 0,49 – 1,44 mol H₂/mol glukosa [33].

PROSES PASCA-PENGOLAHAN (*POST-TREATMENT*)

Pengolahan dengan menggunakan reaktor UASB tidak menjamin dapat dihilangkannya bahan organik, nutrisi, dan patogen yang masih tersisa. Oleh karena itu *post-treatment* air limbah yang diolah biasanya dibutuhkan untuk menghasilkan effluen yang sesuai dengan standar peraturan yang berlaku. Hal tersebut telah berhasil dilakukan pada pengolahan dengan sistem konvensional seperti menggunakan pengolahan kolam maturasi, kolam stabilisasi, *polishing ponds*, *wetlands*, *Rotating Biological Contactors (RBC)*, *moving bed biofilm reactor*, *downflow hanging sponge*, dan Proses oksidasi tingkat lanjut (AOPs) [34]–[38].

Polishing ponds merupakan sistem pengolahan *post-treatment* yang digunakan terutama untuk menghilangkan padatan yang telah dimanfaatkan secara efektif pada pengolahan limbah dengan UASB. Post treatment digunakan untuk menghilangkan patogen, nitrogen dan sisa bahan

organik yang terkandung setelah melalui pengolahan dengan reaktor UASB. Sistem UASB dan *posttreatment* dapat diterapkan secara berurutan atau terintegrasi [2].

PENGARUH BEBERAPA PARAMETER TERHADAP EFISIENSI REAKTOR UASB

Efisiensi reaktor UASB dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain karakteristik air limbah, aklimatisasi lumpur, pH, suhu, nutrisi, adanya senyawa beracun, laju pembebanan (OLR), kecepatan upflow (V_{up}), Hydraulic Retention Time (HRT), proses mixing cairan, dan desain reaktor [39], [40].

a. Pengaruh Suhu

Suhu sangat mempengaruhi kelangsungan hidup mikroorganisme. Pengolahan secara anaerobic bisa terjadi pada tiga jenis suhu yaitu psycrofilik, mesofilik dan termofilik. Suhu yang rendah akan menyebabkan penurunan pada laju pertumbuhan spesifik dan proses metanogenik [12], [41]. Proses metanogenik pada suhu 10 hingga 20 kali lebih rendah dibandingkan kondisi suhu 35⁰C, akan membutuhkan peningkatan biomassa pada reaktor (10 hingga 20 kali lipat), atau harus beroperasi pada kondisi *Sludge Retention Time (SRT)* dan *Hydraulic Retention Time (HRT)* yang lebih tinggi untuk mencapai efisiensi penyisihan COD yang sama pada suhu 35⁰C [40], [42].

Penurunan suhu akan memperlambat proses hidrolisis dan menurunkan pertumbuhan maksimum serta tingkat pemanfaatan substrat [25]. Pengolahan air limbah menggunakan reaktor UASB pada kondisi suhu rendah, menyebabkan efisiensi penyisihan COD menjadi 70 % pada suhu 11⁰C, dan 30 hingga 50 % pada suhu 6⁰C [43]. Peningkatan produksi gas metana akan meningkat jika terjadi peningkatan suhu akibat proses metanogenik yang dipercepat. Namun produksi gas metana akan menurun secara signifikan jika suhu pada reaktor melebihi 45⁰C akibat terjadinya penurunan substansial dalam aktivitas lumpur granular karena inaktivasi bakteri [44]. Pengolahan pada air limbah dengan kandungan COD yang besar (COD = 1531 mg/L), maka akan membuat efisiensi penyisihan COD total adalah 62 % pada musim panas dan 51 % pada musim dingin pada suhu sekitar 18 – 25⁰C dan waktu retensi hidrolis (HRT) adalah 24 jam [14].

b. Pengaruh Hydraulic Retention Time (HRT)

Waktu retensi hidrolis merupakan salah satu parameter penting yang mempengaruhi kinerja reaktor terutama terhadap air limbah perkotaan [18], [20]. Kecepatan upflow (V_{up}) yang berhubungan langsung HRT merupakan faktor penting untuk menangkap padatan tersuspensi. Jika terjadi penurunan V_{up} , maka diperlukan peningkatan HRT sehingga akan meningkatkan efisiensi penyisihan padatan tersuspensi (*Suspended Solid*) selama proses pengolahan [7], [45], [46]. Efisiensi penyisihan COD dengan reaktor UASB akan berkurang jika V_{up} semakin meningkat, karena V_{up} yang tinggi akan menyebabkan berkurangnya waktu kontak antara lumpur dan air limbah, selain itu juga menyebabkan hancurnya butiran lumpur yang terbentuk sehingga saat *washout* kandungan padatan akan tinggi [42], [47].

Laju aliran juga merupakan parameter yang mempengaruhi operasional untuk mempertahankan *Hydraulic Retention Time (HRT)*. Di dalam proses UASB, jika diameter terlalu besar maka akan menyebabkan selama penyaluran cairan waktu kontak yang kurang memadai antara substrat dan biomassa. Oleh karena itu, reaktor yang besar akan menyebabkan penurunan produksi biogas akibat proses mixing yang kurang di dalam reaktor. Namun sebaliknya, jika reaktor mempunyai ketinggian yang cukup, maka akan

mendorong terjadinya kontak dan mixing yang optimal antara substrat dan mikroorganisme sehingga dapat menghasilkan degradasi bahan organik yang tinggi dan pembentukan biogas yang meningkat [48]. Batas Vup yang diperbolehkan adalah 0,5 – 1,5 m/jam [2]. Sedangkan untuk pengolahan air limbah perkotaan dengan reaktor UASB, beberapa peneliti melaporkan keberhasilan operasi pada 0,31 – 0,426 m³/jam pada 3-4 jam HRT [8], [14].

c. Pengaruh *Organic Loading Rate (OLR)*

OLR merupakan parameter utama yang mempengaruhi kehidupan mikroba dan keberfungsian proses UASB. Pada pengolahan air limbah, OLR biasanya diterapkan pada kisaran 1,0 – 2,0 kg COD/m³.hari [49], [50]. Reaktor yang diunggulkan dengan lumpur aktif granular akan dapat berproses dengan kinerja yang tinggi dalam waktu yang singkat, dan juga cepat beradaptasi dengan peningkatan OLR [19]. Peningkatan efisiensi kinerja reaktor anaerobik laju tinggi sebanding dengan meningkatnya OLR [51]. Namun pada peningkatan OLR tertentu, akan membentuk endapan lumpur dan busa yang berlebihan pada zona GLSS (Gas-Liquid-Solids separation). Oleh karena itu OLR optimum digunakan pada kisaran suhu dan air limbah tertentu [52].

OLR yang lebih tinggi dari optimum mengakibatkan terjadinya akumulasi biogas dalam sludge bed sehingga membentuk kantong gas yang menyebabkan terjadinya sludge flotation [19]. Pada kasus limbah yang memiliki COD yang lebih rendah dari 300 mg/L (dengan OLR 0,4-0,8 kg COD/m³.hari), efisiensi penyisihan COD pada reaktor UASB rendah (50-53 %). Namun efisiensi penyisihan COD menjadi 64 % jika kandungan COD influen sekitar 300 mg/L (OLR 1,2 kg COD/m³.hari). jika COD influen lebih tinggi (300 hingga 816 mg/L) dengan OLR 2,2-3,3 kg COD/m³.hari, maka penyisihan COD akan berkisar antara 57 hingga 67 % [2].

Untuk menggambarkan kinerja reaktor UASB, maka OLR dan HRT untuk COD influen harus diperiksa [42]. Peningkatan OLR akan mengakibatkan penurunan efisiensi penyisihan padatan tersuspensi. Namun pada OLR tertentu, efisiensi pada reaktor pada UASB akan optimal jika waktu HRT lama, dan beban COD pada influen tinggi. OLR merupakan parameter desain yang tidak cukup untuk menjamin kinerja yang baik pada reaktor anaerobik [50].

d. Pengaruh pH

pH pada reaktor anaerobik sangat penting karena proses metanogenesis dapat berjalan dengan kecepatan tinggi jika pH dipertahankan pada kisaran 6,3-7,8 [53]. Reaktor UASB yang digunakan untuk pengolahan air limbah di negara tropis dan subtropis mempunyai pH yang cukup stabil. Peningkatan hidrolisis dan asidogenesis akan dicapai secara optimal saat mengolah air limbah domestik dengan reaktor anaerobik pada pH 7 [54].

e. Pengaruh Granulasi

Di dalam reaktor UASB, waktu HRT yang lama akan merugikan dalam pembentukan granular lumpur [51], [55]. Sebaliknya jika waktu HRT pendek akan menyebabkan terjadinya pencucian biomassa. Kedua kondisi tersebut akan merugikan untuk mencapai hasil yang optimal pada reaktor UASB. Meskipun granulasi dianggap penting dalam pengolahan air limbah domestik pada reaktor UASB, namun reaktor ini bekerja efektif walaupun tanpa ada butiran [2]. Pembentukan butiran pada saat *start-up* akan sangat membantu dalam mempersingkat waktu *start-up* [56]–[58].

Kinerja reaktor UASB yang tinggi tergantung pada pembentukan lumpur aktif pada bagian bawah reaktor. Pembentukan lapisan lumpur terjadi karena adanya akumulasi padatan tersuspensi yang masuk dan adanya pertumbuhan bakteri. Padatan tersuspensi mempunyai kecepatan pengendapan yang lebih besar (20-80 m/jam) jika dibandingkan Kecepatan *upflow* (V_{up}) [2]. Pembentukan lumpur aktif sangat penting, baik dalam bentuk granular maupun dalam bentuk flokulen, dimana lumpur didalam reaktor berguna untuk menjamin efisiensi penyisihan yang tinggi bahkan saat OLR tinggi [59].

f. Pengaruh Mixing (Pencampuran)

Mixing memberikan waktu kontak yang efektif antara mikroba dan air limbah, mengurangi halangan untuk transfer massa, menurunkan pertumbuhan produk sampingan yang represif, dan membuat kondisi lingkungan yang seragam. Jika mixing tidak tepat, laju proses akan terhambat oleh kantong-kantong substrat, akibatnya menyebabkan terjadinya perubahan pH dan suhu pada setiap tahap [60]. Mixing dapat dicapai pada kondisi optimal secara mekanis atau dengan resirkulasi gas metana atau *slurry*. Efisiensi *mixing* yang ditingkatkan untuk mengolah air limbah secara anaerobik pada konsentrasi COD yang tinggi, dengan resirkulasi *slurry* menunjukkan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan resirkulasi biogas atau *mixing* menggunakan *impeller* [61].

Mixing juga menyebabkan meningkatnya produksi biogas dibandingkan dengan digester yang tidak di mixing [61]. Mixing yang tidak kontinu pada pengolahan air limbah perkotaan akan lebih menguntungkan jika dibandingkan dengan mixing yang kontinu [60]. Terbentuknya granular lumpur karena terjadinya fuidisasi. Proses mixing yang kuat tidak direkomendasikan karena proses metanogenesis kurang efektif pada kondisi tersebut [62]. Mixing pada periode strat-up akan menurunkan pH, menyebabkan kinerja yang tidak stabil dan periode start-up yang lama [61].

KESIMPULAN

UASB telah berhasil diterapkan untuk pengolahan air limbah industri dan air limbah perkotaan dengan kandungan organik dan beban COD yang tinggi di negara-negara yang beriklim sedang. Namun demikian penggunaan reaktor ini harus memperhatikan kondisi negara-negara dengan iklim yang sesuai. Modifikasi reaktor UASB, penggunaan reaktor UASB dengan pengolahan lain (posttreatment) untuk menghilangkan patogen dapat dijadikan untuk penelitian lebih lanjut. Selain itu evaluasi kinerja UASB juga perlu penelitian lebih lanjut sehingga pengolahan air limbah dapat dilakukan secara efektif dan efisien.

REFERENSI

- [1] UN-Water, *Waterwater - The Untapped Resources*. 2017.
- [2] M. K. Daud *et al.*, "Review of upflow anaerobic sludge blanket reactor technology: Effect of different parameters and developments for domestic wastewater treatment," *Journal of Chemistry*, vol. 2018. Hindawi Limited, 2018. doi: 10.1155/2018/1596319.
- [3] U. Jeppsson and D. Hellström, "Systems analysis for environmental assessment of urban water and wastewater systems," in *Water Science and Technology*, 2002. doi: 10.2166/wst.2002.0671.

- [4] D. Martinez-Sosa, B. Helmreich, and H. Horn, "Anaerobic submerged membrane bioreactor (AnSMBR) treating low-strength wastewater under psychrophilic temperature conditions," *Process Biochemistry*, vol. 47, no. 5, 2012, doi: 10.1016/j.procbio.2012.02.011.
- [5] K. Yetilmezsoy and S. Sakar, "Development of empirical models for performance evaluation of UASB reactors treating poultry manure wastewater under different operational conditions," *J Hazard Mater*, vol. 153, no. 1–2, 2008, doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.08.087.
- [6] E. Metcalf and H. Eddy, *Wastewater engineering: treatment and reuse*. 2003.
- [7] G. Haandel, A. C. Van; Lettinga, "Anaerobic sewage treatment: a practical guide for regions with a hot climate," in *Anaerobic sewage treatment: a practical guide for regions with a hot climate*, 1994.
- [8] S. Uemura and H. Harada, "Treatment of sewage by a UASB reactor under moderate to low temperature conditions," *Bioresour Technol*, vol. 72, no. 3, 2000, doi: 10.1016/S0960-8524(99)00118-2.
- [9] I. Ruiz, M. Soto, M. C. Veiga, P. Ligeró, A. Vega, and R. Blázquez, "Performance of and biomass characterisation in a UASB reactor treating domestic waste water at ambient temperature," *Water SA*, vol. 24, no. 3, 1998.
- [10] A. Farghaly and A. Tawfik, "Simultaneous Hydrogen and Methane Production Through Multi-Phase Anaerobic Digestion of Paperboard Mill Wastewater Under Different Operating Conditions," *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 181, no. 1, 2017, doi: 10.1007/s12010-016-2204-7.
- [11] H. H. P. Fang and Y. Liu, "Anaerobic wastewater treatment in (sub-)tropical regions," in *Advances in Water and Wastewater Treatment Technology*, 2001. doi: 10.1016/b978-044450563-7/50212-2.
- [12] I. Bodík, B. Herdová, and M. Drtil, "Anaerobic treatment of the municipal wastewater under psychrophilic conditions," *Bioprocess Engineering*, vol. 22, no. 5, 2000, doi: 10.1007/s004490050748.
- [13] Y. J. Chan, M. F. Chong, C. L. Law, and D. G. Hassell, "A review on anaerobic-aerobic treatment of industrial and municipal wastewater," *Chemical Engineering Journal*, vol. 155, no. 1–2, 2009. doi: 10.1016/j.cej.2009.06.041.
- [14] M. Halalsheh *et al.*, "Treatment of strong domestic sewage in a 96 m³ UASB reactor operated at ambient temperatures: Two-stage versus single-stage reactor," *Bioresour Technol*, vol. 96, no. 5, 2005, doi: 10.1016/j.biortech.2004.06.014.
- [15] P. Kongjan, S. O-Thong, and I. Angelidaki, "Hydrogen and methane production from desugared molasses using a two-stage thermophilic anaerobic process," *Eng Life Sci*, vol. 13, no. 2, 2013, doi: 10.1002/elsc.201100191.

- [16] M. Hernández and M. Rodríguez, "Hydrogen production by anaerobic digestion of pig manure: Effect of operating conditions," *Renew Energy*, vol. 53, 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.11.024.
- [17] F. Y. Cakir and M. K. Stenstrom, "Greenhouse gas production: A comparison between aerobic and anaerobic wastewater treatment technology," *Water Res*, vol. 39, no. 17, 2005, doi: 10.1016/j.watres.2005.07.042.
- [18] S. M. M. Vieira and A. D. Garcia, "Sewage treatment by UASB-reactor. Operation results and recommendations for design and utilization," *Water Science and Technology*, vol. 25, no. 7, 1992, doi: 10.2166/wst.1992.0147.
- [19] S. V. Kalyuzhnyi *et al.*, "Organic removal and microbiological features of UASB-reactor under various organic loading rates," *Bioresour Technol*, vol. 55, no. 1, 1996, doi: 10.1016/0960-8524(95)00100-X.
- [20] R. F. Hickey, W. M. Wu, M. C. Veiga, and R. Jones, "Start-up, operation, monitoring and control of high-rate anaerobic treatment systems," in *Water Science and Technology*, 1991. doi: 10.2166/wst.1991.0226.
- [21] Y. Kalogo and W. Verstraete, "Development of anaerobic sludge bed (ASB) reactor technologies for domestic wastewater treatment: Motives and perspectives," *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 15, no. 5, 1999. doi: 10.1023/A:1008950121308.
- [22] S. C. Oliveira and M. Von Sperling, "Performance evaluation of UASB reactor systems with and without post-treatment," *Water Science and Technology*, vol. 59, no. 7, 2009, doi: 10.2166/wst.2009.138.
- [23] S. Chong, T. K. Sen, A. Kayaalp, and H. M. Ang, "The performance enhancements of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors for domestic sludge treatment - A State-of-the-art review," *Water Research*, vol. 46, no. 11, 2012. doi: 10.1016/j.watres.2012.03.066.
- [24] J. B. Van Lier, A. Vashi, J. Van Der Lubbe, and B. Heffernan, "Anaerobic sewage treatment using UASB reactors: Engineering and operational aspects," in *Environmental Anaerobic Technology: Applications and New Developments*, 2010. doi: 10.1142/9781848165434_0004.
- [25] G. Lettinga, S. Rebac, and G. Zeeman, "Challenge of psychrophilic anaerobic wastewater treatment," *Trends in Biotechnology*, vol. 19, no. 9, 2001. doi: 10.1016/S0167-7799(01)01701-2.
- [26] L. Seghezze, *Anaerobic treatment of domestic wastewater in subtropical regions*, vol. 27, 2004.
- [27] A. C. van Haandel, "Integrated energy production and reduction of the environmental impact at alcohol distillery plants," *Water Science and Technology*, vol. 52, no. 1–2, 2005, doi: 10.2166/wst.2005.0497.

- [28] B. S. Fernandes, G. Peixoto, F. R. Albrecht, N. K. Saavedra del Aguila, and M. Zaiat, "Potential to produce biohydrogen from various wastewaters," *Energy for Sustainable Development*, vol. 14, no. 2, 2010, doi: 10.1016/j.esd.2010.03.004.
- [29] S. Paudel, Y. Kang, Y. S. Yoo, and G. T. Seo, "Hydrogen production in the anaerobic treatment of domestic-grade synthetic wastewater," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 7, no. 12, 2015, doi: 10.3390/su71215814.
- [30] P. Mohammadi, S. Ibrahim, M. S. M. Annuar, S. Ghafari, S. Vikineswary, and A. A. Zinatizadeh, "Influences of Environmental and Operational Factors on Dark Fermentative Hydrogen Production: A Review," *Clean - Soil, Air, Water*, vol. 40, no. 11, 2012. doi: 10.1002/clen.201100007.
- [31] Y. Zhang and J. Shen, "Effect of temperature and iron concentration on the growth and hydrogen production of mixed bacteria," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 31, no. 4, 2006, doi: 10.1016/j.ijhydene.2005.05.006.
- [32] Y. Mu and H. Q. Yu, "Biological hydrogen production in a UASB reactor with granules. I: Physicochemical characteristics of hydrogen-producing granules," *Biotechnol Bioeng*, vol. 94, no. 5, 2006, doi: 10.1002/bit.20924.
- [33] H. D. Monteith, H. R. Sahely, H. L. MacLean, and D. M. Bagley, "A LIFE-CYCLE APPROACH FOR ESTIMATION OF GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM CANADIAN WASTEWATER TREATMENT," *Proceedings of the Water Environment Federation*, vol. 2003, no. 11, 2012, doi: 10.2175/193864703784755797.
- [34] E. Alonso, A. Santos, and P. Riesco, "Micro-organism re-growth wastewater disinfected by UV radiation and ozone: A micro-biological study," *Environ Technol*, vol. 25, no. 4, 2004, doi: 10.1080/09593332508618452.
- [35] N. Khalil, R. Sinha, a K. Raghava, and a K. Mittal, "UASB Technology for Sewage Treatment in India: Experience, Economic Evaluation and its Potential in Other Developing Countries," *Twelfth International Water Technology Conference*, no. Lcc, 2008.
- [36] M. Tandukar, A. Ohashi, and H. Harada, "Performance comparison of a pilot-scale UASB and DHS system and activated sludge process for the treatment of municipal wastewater," *Water Res*, vol. 41, no. 12, 2007, doi: 10.1016/j.watres.2007.02.027.
- [37] A. Tawfik, F. El-Gohary, and H. Temmink, "Treatment of domestic wastewater in an up-flow anaerobic sludge blanket reactor followed by moving bed biofilm reactor," *Bioprocess Biosyst Eng*, vol. 33, no. 2, 2010, doi: 10.1007/s00449-009-0321-1.
- [38] H. Rizvi, N. Ahmad, A. Yasar, K. Bukhari, and H. Khan, "Disinfection of UASB-treated municipal wastewater by H₂O₂, UV, ozone, PAA, H₂O₂/sunlight, and advanced oxidation processes: Regrowth potential of pathogens," *Pol J Environ Stud*, vol. 22, no. 4, 2013.

- [39] W. R. Abma, W. Driessen, R. Haarhuis, and M. C. M. Van Loosdrecht, "Upgrading of sewage treatment plant by sustainable and cost-effective separate treatment of industrial wastewater," *Water Science and Technology*, vol. 61, no. 7, 2010, doi: 10.2166/wst.2010.977.
- [40] L. Foresti, "Anaerobic treatment of domestic sewage: established technologies and perspectives.," *Water Sci Technol*, vol. 45, no. 10, 2002, doi: 10.2166/wst.2002.0324.
- [41] K. S. Singh, T. Viraraghavan, and D. Bhattacharyya, "Sludge Blanket Height and Flow Pattern in UASB Reactors: Temperature Effects," *Journal of Environmental Engineering*, vol. 132, no. 8, 2006, doi: 10.1061/(asce)0733-9372(2006)132:8(895).
- [42] N. J. A. Mahmoud, *Anaerobic Pre-treatment of Sewage Under Low Temperature (15 °C) Conditions in an Integrated UASB-Digester System*. 2002.
- [43] K. S. Singh, H. Harada, and T. Viraraghavan, "Low-strength wastewater treatment by a UASB reactor," *Bioresour Technol*, vol. 55, no. 3, 1996, doi: 10.1016/0960-8524(96)86817-9.
- [44] J. B. Van Lier and G. Lettinga, "Appropriate technologies for effective management of industrial and domestic waste waters: The decentralised approach," in *Water Science and Technology*, 1999. doi: 10.1016/S0273-1223(99)00599-5.
- [45] R. Rajakumar, T. Meenambal, J. R. Banu, and I. T. Yeom, "Treatment of poultry slaughterhouse wastewater in upflow anaerobic filter under low upflow velocity," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 8, no. 1, 2011, doi: 10.1007/BF03326204.
- [46] R. R. Liu, Q. Tian, B. Yang, and J. H. Chen, "Hybrid anaerobic baffled reactor for treatment of desizing wastewater," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 7, no. 1, 2010, doi: 10.1007/BF03326122.
- [47] V. N. Nkemka and M. Murto, "Evaluation of biogas production from seaweed in batch tests and in UASB reactors combined with the removal of heavy metals," *J Environ Manage*, vol. 91, no. 7, 2010, doi: 10.1016/j.jenvman.2010.03.004.
- [48] M. R. Peña, D. D. Mara, and G. P. Avella, "Dispersion and treatment performance analysis of an UASB reactor under different hydraulic loading rates," *Water Res*, vol. 40, no. 3, 2006, doi: 10.1016/j.watres.2005.11.021.
- [49] X. G. Chen, P. Zheng, J. Cai, and M. Qaisar, "Bed expansion behavior and sensitivity analysis for super-high-rate anaerobic bioreactor," *J Zhejiang Univ Sci B*, vol. 11, no. 2, 2010, doi: 10.1631/jzusB0900256.
- [50] A. Abdelgadir *et al.*, "Characteristics, process parameters, and inner components of anaerobic bioreactors," *BioMed Research International*, vol. 2014. 2014. doi: 10.1155/2014/841573.
- [51] T. T. Ren, Y. Mu, B. J. Ni, and H. Q. Yu, "Hydrodynamics of upflow anaerobic sludge blanket reactors," *AIChE Journal*, vol. 55, no. 2, 2009, doi: 10.1002/aic.11667.

- [52] S. Farajzadehha, S. A. Mirbagheri, S. Farajzadehha, and J. Shayegan, "Lab Scale Study of HRT and OLR Optimization in UASB Reactor for Pretreating Fortified Wastewater in Various Operational Temperatures," *APCBEE Procedia*, vol. 1, 2012, doi: 10.1016/j.apcbee.2012.03.016.
- [53] C. Casserly and L. Erijman, "Molecular monitoring of microbial diversity in an UASB reactor," *Int Biodeterior Biodegradation*, vol. 52, no. 1, 2003, doi: 10.1016/S0964-8305(02)00094-X.
- [54] B. Zhang, L. L. Zhang, S. C. Zhang, H. Z. Shi, and W. M. Cai, "The influence of pH hydrolysis and acidogenesis of kitchen wastes in two-phase anaerobic digestion," *Environ Technol*, vol. 26, no. 3, 2005, doi: 10.1080/09593332608618563.
- [55] D. J. Batstone, J. L. A. Hernandez, and J. E. Schmidt, "Hydraulics of laboratory and full-scale upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactors," *Biotechnol Bioeng*, vol. 91, no. 3, 2005, doi: 10.1002/bit.20483.
- [56] Y. Liu, H. Lou Xu, S. F. Yang, and J. H. Tay, "Mechanisms and models for anaerobic granulation in upflow anaerobic sludge blanket reactor," *Water Res*, vol. 37, no. 3, 2003, doi: 10.1016/S0043-1354(02)00351-2.
- [57] J.-H. Tay, H.-L. Xu, and K.-C. Teo, "Molecular Mechanism of Granulation. I: H + Translocation-Dehydration Theory," *Journal of Environmental Engineering*, vol. 126, no. 5, 2000, doi: 10.1061/(asce)0733-9372(2000)126:5(403).
- [58] S. Aiyuk and W. Verstraete, "Sedimentological evolution in an UASB treating SYNTHES, a new representative synthetic sewage, at low loading rates," *Bioresour Technol*, vol. 93, no. 3, 2004, doi: 10.1016/j.biortech.2003.11.006.
- [59] R. Shahperi *et al.*, "Optimization of methane production process from synthetic glucose feed in a multi-stage anaerobic bioreactor," *Desalination Water Treat*, vol. 57, no. 60, 2016, doi: 10.1080/19443994.2016.1189705.
- [60] P. Kaparaju, I. Buendia, L. Ellegaard, and I. Angelidakia, "Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab-scale and pilot-scale studies," *Bioresour Technol*, vol. 99, no. 11, 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2007.09.015.
- [61] K. Karim, R. Hoffmann, K. T. Klasson, and M. H. Al-Dahhan, "Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing," *Water Res*, vol. 39, no. 15, 2005, doi: 10.1016/j.watres.2005.06.019.
- [62] S. R. Guiot, A. Pauss, and J. W. Costerton, "A structured model of the anaerobic granule consortium," *Water Science and Technology*, vol. 25, no. 7, 1992. doi: 10.2166/wst.1992.0133.