

EFEKTIVITAS PENAMBAHAN Ca^{2+} DAN Mg^{2+} TERHADAP BIOMASSA PEMBENTUKAN GRANULAR AEROBIK PADA SEQUENCING BATCH REACTOR

THE EFFECTIVENES OF Ca^{2+} AND Mg^{2+} ADDITION TO AEROBIC GRANULAR SLUDGE FORMATION IN SEQUENCING BATCH REACTOR

Bowin Yulianti¹, Anja Asmarany² dan Andik Yulianto³

Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia,
Jl. Kaliurang km 14,5 Yogyakarta 55584

¹bowinyulianti20@gmail.com ²165131302@uii.ac.id dan ³025100407@uii.ac.id

Abstrak : Biogranular atau lumpur granular merupakan biomassa yang terbentuk akibat *self-immobilization* suatu mikroorganisme yang melibatkan interaksi antar sel dengan sel lainnya secara biologis, fisika, dan kimia. Keuntungan biogranular dibandingkan dengan pengolahan lumpur aktif konvensional adalah memiliki bentuk yang beraturan, padat, struktur yang kuat, dan kemampuan pengendapan yang baik. Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari pengaruh pembentukan granular aerob dengan variasi penambahan Ca^{2+} dan Mg^{2+} . Ada beberapa faktor yang mempengaruhi pembentukan granular aerob, salah satunya adalah penambahan ion bervalensi dua. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan variasi pada tiga reaktor yakni R-1 tanpa penambahan Ca^{2+} dan Mg^{2+} , R-2 dengan penambahan 25 ml Ca^{2+} , dan R-3 dengan penambahan 25 ml Mg^{2+} . Waktu siklus operasi SBR yang digunakan yaitu 5,2 jam. Parameter dalam penelitian ini yaitu diameter granular, kecepatan pengendapan, *Sludge Volume Index* (SVI), aspek rasio, dan struktur granular. Karakteristik granular yang terbentuk di ketiga reaktor berturut-turut yaitu memiliki diameter sebesar 1,79 mm, 2,02 mm, dan 2,11 mm; kecepatan pengendapan sebesar 33,29 mm/jam, 39,15 mm/jam, dan 49,28 mm/jam; SVI sebesar 75,3 ml/gr, 67,5 ml/gr, dan 43,9 ml/gr; aspek rasio granular aerob sebesar 0,57, 0,72, dan 0,74. Dari ketiga reaktor, R-3 memiliki pengaruh lebih besar terhadap pembentukan granular aerob dibanding reaktor lainnya.

Kata Kunci: granular aerob, *sequencing batch reactor*, penambahan calcium, penambahan magnesium

Abstract : Biogranular or granular sludge is a biomass formed by *self-immobilization* of a microorganism that involves the interaction of cells with other cells biologically, physically, and chemically. Biogranular have many advantages compared to conventional sludge treatment. It has a regular, solid, strong structure, and good settling ability. This study aims to study the effect of granular aerob formation with variation of Ca^{2+} and Mg^{2+} addition. There are several factors that influence the formation of granular aerobes, one of which is the addition of divalent ions. Therefore, this study was conducted on three reactors ie R-1 without Ca^{2+} and Mg^{2+} , R-2 addition with 25 ml Ca^{2+} and R-3 addition with 25 ml Mg^{2+} . The operating cycle time of SBR used is 5.2 hours. Parameters in this study were granular diameter, settling velocity, *Sludge Volume Index* (SVI), aspect ratio, and granular structure. Characteristics of granular formed in three reactor respectively that has a diameter of 1.79 mm, 2.02 mm, and 2.11 mm; settling velocity of 33.29 mm/h, 39.15 mm/h, and 49.28 mm/h; SVI value of 75.3 ml/g, 67.5 ml/g, and 43.9 ml/g; Aspect ratios aerobic granular of 0.57, 0.72, and 0.74. Of the three reactor, R-3 with Mg^{2+} addition has greater influence on aerobic granular formation than other reactors.

Keywords: aerobic granular, *sequencing batch reactor*, calcium augmentation, magnesium augmentation

PENDAHULUAN

Biogranular merupakan kumpulan dari mikroba yang terbentuk akibat dari *self-immobilization* mikroorganisme yang terdiri dari partikel inert, partikel terdegradasi, dan ekstraseluler polimer. Biogranular tersebut mengandung jutaan organisme per gram biomassa dengan tipe dan spesies yang berbeda-beda. Bakteri tersebut memiliki peran masing-masing dalam mendegradasi limbah cair. Sementara itu proses pembentukan biogranular dapat dilakukan dengan granulasi secara aerobik dan anaerobik (Liu, 2004).

Teknologi biogranular telah berkembang sejak lama dalam pengolahan air limbah. Pada umumnya pengolahan air limbah dengan granular dilakukan dengan menggunakan teknologi granulasi anaerobik (Alves, et al., 2000). Teknologi tersebut sering digunakan pada reaktor *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (UASB). Namun teknologi granular anaerobik masih memiliki beberapa kekurangan, yakni membutuhkan waktu *start-up* yang lama dan tidak cocok diaplikasikan untuk air limbah dengan konsentrasi organik rendah (Liu, 2004). Permasalahan tersebut diatasi dengan mengembangkan teknologi baru yaitu granulasi secara aerobik dengan menggunakan *Sequencing Batch Reactor* (SBR) oleh beberapa peneliti (Jungles, 2013; Sajjad, 2014) dan telah digunakan untuk mengolah air limbah yang mengandung konsentrasi organik tinggi, nitrogen, fosfor serta bahan kimia yang bersifat toksik (Moy et al, 2002).

Keuntungan granular aerobik dibandingkan dengan pengolahan lumpur aktif konvensional adalah memiliki bentuk yang beraturan, padat, struktur mikroba yang kuat, dan kemampuan pengendapan yang baik. Selain itu, granular aerobik juga memiliki kemampuan penyimpanan biomassa dan menahan beban muatan (*shock loadings*) yang baik, serta mampu bertahan pada air limbah yang mengandung kadar pencemar yang tinggi (de Kreuk and van Lossdrecht, 2004). Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi pembentukan granular diantaranya komposisi substrat, *Organic Loading Rate* (OLR), waktu pengendapan, *Hidraulic Retention Time* (HRT), *Aerobic Starvation*, kecepatan pertumbuhan mikroorganisme serta penambahan *divalent metal* yang dilaporkan dapat meningkatkan proses granulasi (Liu, 2004 dan Jiang et al., 2003).

Saat ini, berbagai peneliti telah mempelajari efek *divalent metal* seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , dan Mn^{2+} dalam memperkuat granulasi. Jiang et al (2003) menggunakan air limbah yang mengandung 100 mg/l Ca^{2+} dan melaporkan bahwa waktu untuk kultivasi granular berkurang menjadi 16 hari dibandingkan 32 hari tanpa penambahan Ca^{2+} . Selain itu, kemampuan pengendapan dan produksi ekstrapolimer seluler (EPS) lebih besar dibandingkan tanpa penambahan logam. Penelitian lain juga dilakukan oleh Li et al (2008) dengan menambahkan 10 mg/l Mg^{2+} . Secara signifikan waktu granulasi berkurang dari 32 hari menjadi 18 hari. Diameter granular yang terbentuk yaitu 2,9 mm dibandingkan tanpa penambahan Mg^{2+} yaitu 1,8 mm dan memiliki granular yang lebih padat dan kompak. Selain itu penambahan Mg^{2+} berpengaruh terhadap produksi EPS yang tinggi dan kemampuan pengendapan yang baik.

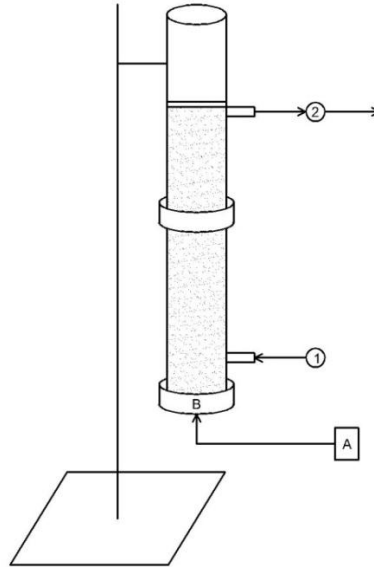
Penelitian ini bertujuan untuk memahami lebih lanjut faktor yang mempengaruhi pembentukan granular secara aerobik dengan perlakuan penambahan *divalent metal* yakni ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} . Penambahan ion tersebut diharapkan dapat mempercepat proses pembentukan granular aerobik pada SBR.

METODE PENELITIAN

Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Mikrobiologi dan Bioteknologi Lingkungan Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia Yogyakarta.

Konfigurasi Reaktor

Reaktor yang digunakan memiliki ketinggian 1,2 m dan diameter 5 cm dengan volume kerja yaitu 2,4 liter. Selama penelitian, reaktor ini dioperasikan dengan sistem *Sequencing Batch Reactor*. Reaktor dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1 Konfigurasi reaktor (Jungles, 2013)

Karakteristik Limbah Cair

Limbah cair yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah sintesis. Substrat yang digunakan adalah asetat. Komposisi limbah sintesis yang digunakan adalah Air limbah sintesis dengan komposisi: glukosa 600 mg/l, NH_4Cl 130 mg/l, K_2HPO_4 20 mg/l, *trace element solution* 1,0 ml/l. Komposisi dari *trace element solution* adalah EDTA 30 mg/l, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1,5 mg/l, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1,5 mg/l, $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ 0,18 mg/l, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 0,15 mg/l, $\text{MnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0,12 mg/l, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 0,03 mg/l (Li et al, 2008). Dalam penelitian ini reaktor 1 (R-1) tanpa penambahan Ca^{2+} dan Mg^{2+} , reaktor 2 (R-2) penambahan 25 mg/l CaCl_2 dan reaktor 3 (R-3) penambahan 25 mg/l $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Seeding dan Aklimatisasi

Sumber mikroorganisme yang digunakan berasal dari lumpur aktif PT. Sari Husada. Kemudian dilakukan aklimatisasi dengan menambahkan substrat asetat. Penambahan substrat dilakukan agar bakteri dapat beradaptasi dengan limbah yang menjadi substratnya dan bekerja secara maksimal dalam proses granulasi. Karakterisasi awal *seeding* dilakukan dengan pengujian parameter TSS. Data tersebut digunakan untuk menentukan jumlah bakteri yang terdapat dalam reaktor.

Operasi Reaktor SBR

Reaktor dioperasikan selama 5,2 jam dengan waktu siklus pada tahap pengisian (*fill*) selama 11 menit, waktu aerasi (*react*) selama 240 menit, waktu pengendapan (*settling*) ditentukan selama 45 menit serta waktu pengurasan (*draw*) selama 14 menit.

Pengambilan Sampel dan Pengukuran Parameter

Metode pengambilan sampel yang digunakan adalah *grab sampling* yakni metode pengambilan sampel yang diambil langsung pada titik tertentu. Sampling dilakukan selama jam kerja yakni pukul 09.00-15.00 WIB dengan volume pengambilan setiap satu kali sampel sebanyak 20 ml. Pada malam hari tidak dilakukan pengambilan sampel, namun reaktor tetap dikondisikan secara kontinu selama 24 jam. Pengambilan sampel dilakukan pada tahap akhir *feeding*, pada tahap akhir *react*, dan pada tahap akhir *settling*. Parameter dalam penelitian, metode pengukuran dan waktu pengujian dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Parameter dalam penelitian

No.	Parameter	Metode Pengukuran	Waktu Pengujian
1	Temperatur	SNI 06-6989.23-2005	
2	pH	SNI 06-6989.11-2004	
3	DO	SNI 06-6989.14-2004	Setiap hari
4	COD	SNI 6989.2-2009	
5	MLSS	SNI 06-6989.3-2004	
6	Aspek Rasio	Jurnal Tay et al (2001)	2 hari sekali
7	Diameter	Visual	
8	Kecepatan Pengendapan	Gelas ukur 1 L, stopwatch	Setiap hari
9	SVI	Gelas ukur 1 L, stopwatch	2 hari sekali
10	Morfologi Granular	Mikroskop, kaca preparat	3 hari sekali

Kecepatan pengendapan diukur dengan membagi jarak dengan waktu. Sedangkan aspek rasio dengan menarik garis sebanyak 4 buah untuk mengetahui jarak terpanjang dan jarak terpendek dari sebuah granular kemudian membagi jarak terpendek tersebut dengan jarak terpanjang dari granular. Bentuk dan ukuran diketahui dengan pengamatan visual, sedangkan struktur granular dilakukan dengan pengamatan mikroskop dan *Scanning Electron Microscope* (SEM).

Analisis Data

A. Efisiensi Penyisihan Organik

Untuk mengetahui besar efisiensi penyisihan organik pada pembentukan granular aerob dapat menggunakan persamaan:

$$\eta = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100\%$$

Dimana :

C_0 = konsentrasi COD pada tahap akhir *feeding* (mg/l) ; C_e = konsentrasi COD pada tahap akhir *react* (mg/l)

B. Analisis Variasi (ANOVA)

Uji ANOVA dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan Ca^{2+} dan Mg^{2+} terhadap kualitas granular yang terbentuk. Uji ini dilakukan dengan menggunakan *Microsoft Excel*. Anova yang digunakan dalam penelitian adalah anova satu arah (*single factor*).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Kondisi Lingkungan

Parameter kondisi lingkungan yang diukur yaitu, pH, *Dissolved Oxygen* (DO), dan temperatur. Hasil pengukuran pada tahap seeding menunjukkan nilai pH adalah 6,73 ; 6,91 ; 7,15 dan 7,12. Pada tahap aklimatisasi terjadi penurunan pH menjadi 3,6 ; 3,4 dan 4,8. Nilai pH dijaga dengan menambahkan NaOH 10% sesuai kebutuhan agar pH tetap optimum. Selanjutnya pada tahap operasi nilai pH pada tiga reaktor secara berturut-turut yaitu 5 ; 5,4 dan 5,3. Perbedaan nilai pH dapat dikaitkan dengan aktivitas enzim di ketiga reaktor. Bakteri membutuhkan enzim untuk mengkatalis reaksi-reaksi yang berhubungan dengan pertumbuhan bakteri.

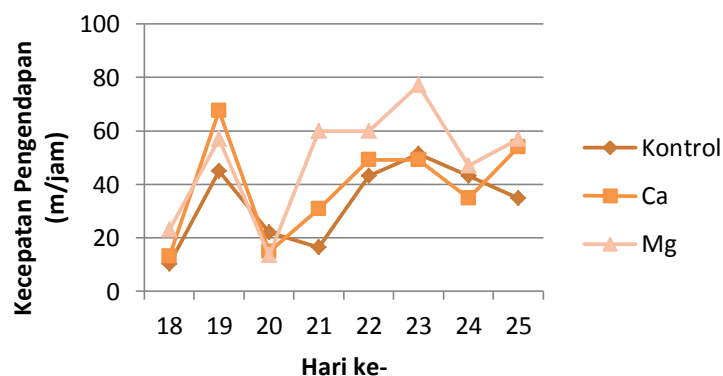
Dalam proses respirasi, mikroorganisme memerlukan oksigen sebagai akseptor elektron. Untuk itu keberadaan oksigen sangat diperlukan bagi mikroorganisme dalam sistem pengolahan air limbah aerobik. Hasil pengukuran oksigen terlarut pada siklus *feeding* berada pada rentang 5 – 7 mg/l. Sedangkan hasil pengukuran oksigen terlarut pada siklus *react* berada pada rentang 5,5 – 9 mg/l. Kadar DO pada tahap *feeding* sedikit lebih rendah, karena pada siklus ini tidak dilakukan suplai oksigen kedalam reaktor.

Temperatur perlu dijaga agar membentuk granular yang teratur dan mencegah terbentuknya mikroorganisme berfilamen. Suhu optimal untuk pembentukan granular aerob adalah 30° C (dari suhu 25, 30, dan 35° C). Rata-rata temperatur pada ketiga reaktor yakni 26°C. Dari temperatur tersebut, dapat diketahui bahwa bakteri yang tumbuh dalam tiga reaktor tersebut adalah jenis bakteri mesofil yang dapat tumbuh pada suhu 20 - 45°C.

Karakteristik Fisik Granular Aerob

Beberapa parameter yang diamati untuk mengetahui karakteristik fisik granular aerob yaitu pengukuran *Total Suspended Solid* (TSS), diameter granular, *Sludge Volume Index* (SVI), kecepatan pengendapan, aspek rasio, dan morfologi granular. Nilai TSS menunjukkan biomassa yang berada dalam reaktor. Kadar MLSS pada tiga reaktor berturut-turut berada pada rentang 3000 – 6500 mg/l; 2300 – 4100 mg/l; dan 2200 – 4800 mg/l. Dari ketiga reaktor, terjadi peningkatan sampai hari ke 25, ini menunjukkan bahwa terjadi peningkatan aktivitas mikroorganisme didalam lumpur.

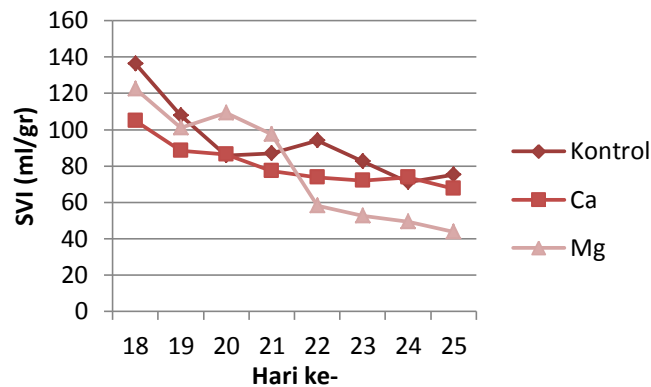
Pengukuran kecepatan pengendapan dilakukan untuk mengetahui besar kemampuan pengendapan granular. Kecepatan pengendapan granular pada tahap operasi dapat dilihat pada **Gambar 2**.



Gambar 2 Kecepatan pengendapan granular berbagai variasi reaktor

Kecepatan rata-rata granular pada *sampling* hari ke 18 hingga hari ke 25 pada tiga reaktor berturut-turut yaitu 33,29 m/jam; 39,15 m/jam; dan 49,28 m/jam. Berdasarkan literatur, kecepatan pengendapan ketiga reaktor telah mencapai kecepatan granular optimal yakni 30 – 70 m/jam (Liu, 2004).

Pada pengukuran SVI, nilai SVI cenderung menurun dari hari ke 18 hingga hari ke 25. Nilai SVI reaktor Mg memiliki nilai SVI paling rendah yakni 43,9 ml/gr dibanding reaktor Ca dengan nilai SVI 67,5 ml/gr. Diantara ketiga reaktor, nilai SVI yang paling tinggi pada hari ke-25 adalah reaktor kontrol dengan nilai SVI 75,3 ml/gr. Pada umumnya, nilai SVI yang baik bagi granular aerob yakni dibawah 50 ml/g (Qin et al., 2004). Grafik SVI pada tahap operasi dapat dilihat pada **Gambar 3**.



Gambar 3 Nilai SVI berbagai variasi reaktor

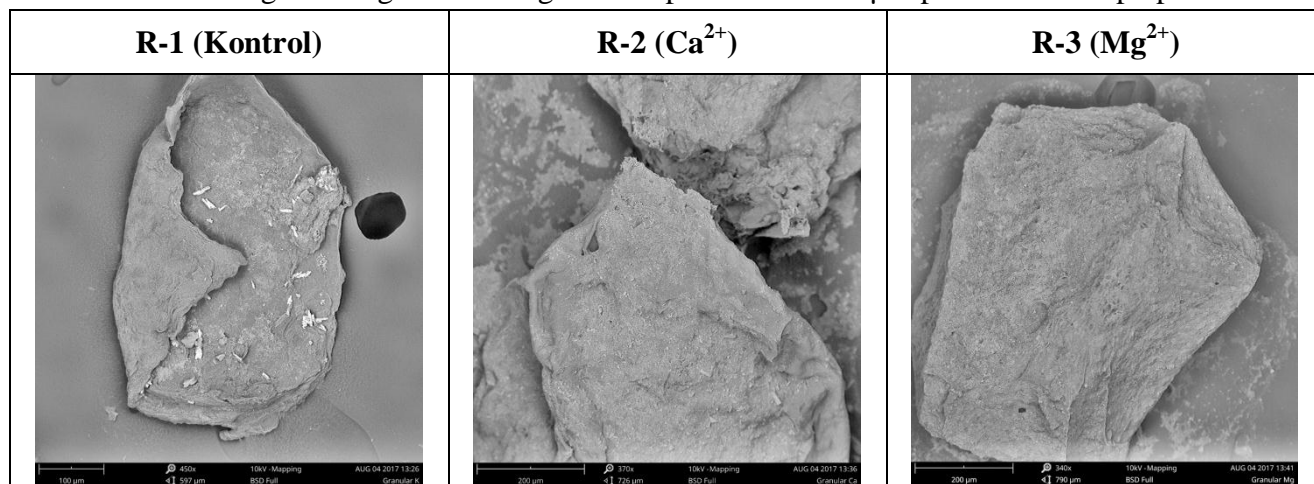
Morfologi granular diperiksa dengan menggunakan mikroskop dan SEM. Hasil analisa menunjukkan karakteristik yang berbeda antara granular dengan penambahan Ca^{2+} dan Mg^{2+} . Hasil pengamatan granular pada mikroskop diperlihatkan pada **Tabel 2**. Sedangkan untuk pengamatan SEM pada hari terakhir penelitian dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Tabel 2 Foto granular berbagai variasi reaktor

Reaktor	Minggu 1	Minggu 2	Minggu 3	Minggu 4
R-1 (Kontrol)				
R-2 (Ca^{2+})				
R-3 (Mg^{2+})				

Secara visual, pada minggu pertama struktur granular belum menyatu sempurna. R-1 dan R-3 telah terjadi pepadatan granular, tetapi masih memiliki rongga-rongga. Sedangkan pada R-2 terlihat granular mulai memadat, namun masih adanya sekat pada granular tersebut. Pada minggu keempat penelitian, granular mulai terlihat padat dan kompak. Warna pada granular R-2 terlihat kuning kecoklatan, sedangkan warna granular R-3 lebih gelap dibandingkan R-2. Pada R-2 dan R-3 terlihat permukaan granular yang lebih bulat dan lebih bersih.

Tabel 3 Pengamatan granular dengan SEM perbesaran 200 μm pada akhir tahap operasi



Terdapat perbedaan struktur granular yang signifikan pada tiga reaktor. Granular R-1 memiliki struktur yang tidak beraturan, namun granular R-2 dan R-3 memiliki bentuk yang bulat dan permukaan granular yang bersih. Rata-rata diameter granular pada R1, R2, dan R3 berturut-turut yakni 1,79 mm, 2,02 mm, dan 2,11 mm. Berdasarkan literatur, diameter rata-rata granular aerob berkisar 0,2 mm – 5 mm (Liu, 2004). Penambahan Ca^{2+} dan Mg^{2+} berpengaruh terhadap pembentukan granular karena Ca^{2+} dan Mg^{2+} dapat berikatan dengan kelompok negatif yang berada dipermukaan bakteri membentuk lapisan dengan molekul EPS yang bertindak sebagai jembatan untuk menghubungkan komponen-komponen sehingga dapat menaikkan agregat bakteri (Li et al., 2008). Selanjutnya dilakukan pengukuran aspek rasio. Aspek rasio merupakan perbandingan ukuran terkecil dengan ukuran terpanjang granular. Karakteristik granular dengan substrat asetat memiliki rata-rata aspek ratio sebesar 0,73. Aspek rasio rata-rata granular pada *sampling* hari ke 18 hingga hari ke 25 pada tiga reaktor berturut-turut yaitu 0,57; 0,72; dan 0,74. Dari ketiga reaktor, reaktor Ca dan Mg memiliki granular lebih bulat dibandingkan reaktor tanpa penambahan Ca dan Mg. **Tabel 4** menunjukkan hasil pengukuran aspek rasio pada tiga reaktor.

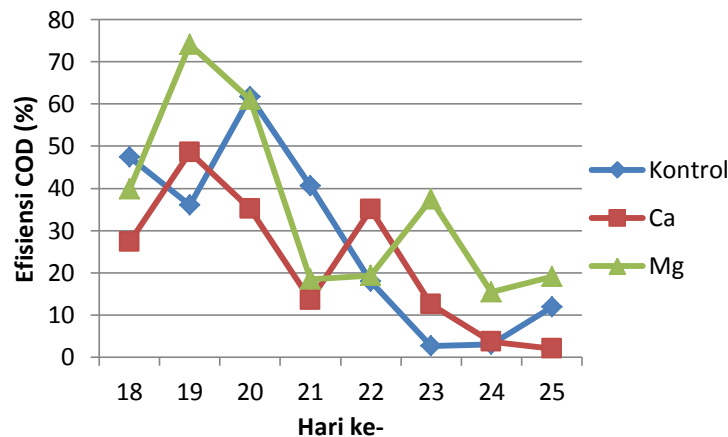
Tabel 4 Aspek rasio granular pada tiga reaktor

Hari ke-	R-1 (Kontrol)	R-2 (Ca)	R-3 (Mg)
18	0.42	0.67	0.64
19	0.60	0.89	0.73
20	0.67	0.73	0.74
21	0.68	0.72	0.67

Hari ke-	R-1 (Kontrol)	R-2 (Ca)	R-3 (Mg)
22	0.47	0.68	0.58
23	0.25	0.66	0.81
24	0.79	0.71	0.86
25	0.66	0.73	0.88

Efisiensi Penyisihan COD

Pada proses pembentukan granular, dilakukan pemantauan terhadap konsentrasi COD dalam air limbah. Efisiensi penyisihan organik pada R-1, R-2, dan R-3 berturut-turut yaitu berkisar 2,7% - 61,7%; 2,1% - 48,6%; dan 15,4% - 74,1 %. Efisiensi COD terjadi penurunan dari hari ke-21 hingga hari ke-24, dan rata-rata efisiensi yang didapat dari tiga reaktor menunjukkan angka yang rendah. Dapat disimpulkan bahwa kemampuan granular dalam menyisihkan COD masih rendah. Hal tersebut kemungkinan disebabkan granular yang terbentuk belum matang sempurna. Grafik penyisihan COD dapat dilihat pada **Gambar 4**.



Gambar 4 Efisiensi COD berbagai variasi reaktor

Analisis Variansi (ANOVA)

Pengujian statistik pada penelitian ini menggunakan ANOVA: *Single Factor* untuk mengetahui seberapa besar pengaruh variasi penambahan *divalent metal* (Ca^{2+} dan Mg^{2+}) sebagai variabel bebas terhadap kualitas granular yang terbentuk. Keputusan diambil jika nilai signifikansi $>0,05$ maka H_0 (hipotesis nol) ditolak, yakni adanya perbedaan antara ukuran populasi dan ukuran sampel. Sehingga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap variabel tetapnya. Hasil perhitungan nilai signifikansi ditunjukkan pada **Tabel 5**.

Tabel 5 Rekapitulasi nilai signifikansi

	Kecepatan Pengendapan	SVI	Diameter granular	Aspek Rasio
Kontrol				
Ca^{2+}	0,244421	0,460528	0,544498	0,022502*
Mg^{2+}				

*Nilai signifikansi $< 0,05$

Berdasarkan pengujian anova, penambahan Ca^{2+} dan Mg^{2+} hanya berpengaruh terhadap nilai aspek rasio granular. Hal ini membuktikan bahwa selain mempercepat waktu pembentukan granular, penambahan Ca^{2+} dan Mg^{2+} berpengaruh terhadap tingkat kebulatan granular yang terbentuk.

KESIMPULAN

Pada penelitian ini, granular aerob dibentuk dengan penambahan *divalent metal* yakni Ca^{2+} dan Mg^{2+} . Pada hari ke-25, granular dengan penambahan Ca^{2+} dan Mg^{2+} telah terbentuk dan berpengaruh terhadap morfologi granular. Karakteristik granular yang dibentuk dengan penambahan Ca^{2+} dan Mg^{2+} memiliki struktur yang lebih halus dan padat. Selain itu memiliki bentuk granular yang lebih bulat. Kemudian granular aerob dengan penambahan Ca^{2+} dan Mg^{2+} memiliki diameter granular yang lebih besar dibandingkan dengan tanpa adanya penambahan Ca^{2+} dan Mg^{2+} .

DAFTAR PUSTAKA

- Alves, M., Cavaleiro, A.J., Ferreira, E.C., Amaral, A.L., Mota, M., da Mota, M., Vivier, H., Pons, M.N. 2000. **Characterization by image analysis of anaerobic sludge under shock conditions.** Water Sci Technol 41:207-14
- De Kreuk, M.K., Pronk, M., Van Loosdrecht, M.C.M. 2004. **Selection of slow growing organisms as means for improving aerobic granular sludge stability.** Water Sci Technol 49:9-17
- Jiang, H.L., Tay, J.H., Liu, Y., Tay, S.T.L. 2003. **Ca^{2+} augmentation for enhancement of aerobically grown microbial granules in sludge blanket reactor.** Biotechnol. 25:95-99
- Jungles, M.K., Campos, J.L., Costa, R.H.R. 2013. **Sequencing batch reactor operation for treating wastewater with aerobic granular sludge.** Brazilian Journal of Chemical Engineering Vol. 31 No. 1 pp 27-33
- Li, X.M., Liu, Q.Q., Yang, Qi., Guo, Liang, Zeng, G.M., Hu, J.M., Zheng, Wei. 2008. **Enhanced aerobic sludge granulation in sequencing batch reactor by Mg^{2+} augmentation.** Bioresource Technology 100:64-67
- Liu, Yu., Hwa, Tay-Joo. 2004. **State of the art of biogranulation technology for wastewater treatment.** Biotechnology Advance 22:533-563
- Moy B.Y.P., Tay J.H., Toh S.K., Liu Y., Tay S.T.L. 2002. **High organic loading influences the physical characteristics of aerobic sludge granules.** Lett Appl Microbiology;34:407-12
- Qin, L., Tay, J.H., Liu, Y. 2004. **Selection pressure is a driving force of aerobic granulation in sequencing batch reactors.** Process Biochem 39:579-84
- Sajjad, M., Kim, S.K. 2014. **Studies on interactions of Ca^{2+} and Mg^{2+} with EPS and their role in determining the physicochemical characteristics of granular sludge in SBR system.** Process Biochemistry