e-ISSN : 2686-2506

Majalah Farmasetika, 11 (1) 2026, 37-47
https://doi.org/10.24198/mfarmasetika.v11i1.68236
Artikel Penelitian

Evaluasi Emisi Karbon Dioksida (Co_2) Proses Granulasi pada Produksi Tablet Y di Pabrik X

Halwa Aulia Nurdin, Nyi Mekar Saptarini, Bagus Muhti Bactiar*

Program Studi Profesi Apoteker, Fakultas Farmasi, Universitas Padjadjaran, Jawa Barat, Indonesia

*E-mail : halwa21001@mail.unpad.ac.id

(Submit 21/11/2025, Revisi 03/12/2025, Diterima 23/12/2025, Terbit 25/01/2026)

Abstrak

Emisi karbon dioksida (CO_2) merupakan indikator penting dalam menilai dampak aktivitas energi dan industri terhadap lingkungan. Pada tahun 2024, total emisi CO_2 dari penggunaan bahan bakar fosil dan industri di Indonesia mencapai 812,22 juta ton, yang setara dengan 2,1% dari total emisi global dan 3,47% dari total emisi CO_2 benua asia. Meskipun kontribusi sektor industri tertentu relatif kecil dalam skala nasional, emisi dari proses produksi tetap memberikan dampak yang signifikan pada akumulasi emisi jangka panjang. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi proses granulasi tablet Y di Pabrik X dengan metode observasional-deskriptif pendekatan kuantitatif. Penelitian dilakukan dengan mengkaji durasi pelaksanaan serta emisi CO_2 yang dihasilkan selama proses granulasi tablet Y yang diproduksi pada periode Januari-Desember 2024. Proses granulasi dilakukan dalam sistem batch dengan kapasitas 845.000 kg (1.300.000 tablet) per batch. Hasil yang didapatkan proses granulasi tersebut menghasilkan emisi sebesar 596.409 gram per batch dan mencapai 40,5 ton per tahun. Temuan ini menegaskan bahwa upaya mitigasi pada level industri memiliki peranan penting dalam mendukung strategi pengurangan emisi nasional serta pencapaian target pengendalian perubahan iklim.

Kata kunci: Emisi CO_2, Granulasi, Industri farmasi, Konsumsi energi Listrik,

Pendahuluan

Karbon dioksida (CO_2) merupakan salah satu jenis gas rumah kaca yang berperan besar dalam menyebabkan pemanasan global. Pemanasan global atau meningkatnya suhu bumi memiliki dampak serius yaitu terjadinya perubahan iklim, ekosistem keanekaragaman hayati terganggu, serta meningkatnya gangguan kesehatan (1). Gangguan kesehatan karena adanya perubahan iklim yang cukup ekstrim dapat berdampak pada kesehatan mental. Perubahan iklim memicu adanya perpindahan penduduk karena bencana iklim dan hasil panen yang tidak menentu sehingga berpotensi pada gangguan kecemasan, stress, dan depresi (2).

Emisi CO_2 merupakan salah satu dampak utama dari aktivitas manusia. Menurut *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) *Guidelines*, sumber emisi gas rumah kaca nasional dibagi kedalam empat sektor utama yaitu energi, proses industri dan penggunaan produk, pertanian, kehutanan, dan perubahan penggunaan lahan, serta sektor limbah (3). Di Indonesia, emisi CO_2 pada tahun 2024 tercatat mencapai 38.599 $MtCO_2$ (4). Jumlah tersebut menunjukkan tren peningkatan tahunan, dengan kenaikan sebesar 1,3% dibandingkan tahun 2023.

Sektor industri farmasi menjadi salah satu penyumbang emisi CO_2 dari aktivitas produksi yang tinggi serta transportasi distribusi obat (5). Penggunaan energi yang tinggi pada aktivitas produksi mendorong adanya langkah-langkah mitigasi melalui pengendalian seluruh kegiatan yang berpotensi menghasilkan emisi. Meskipun secara keseluruhan sektor industri menyumbang porsi yang relatif kecil terhadap peningkatan emisi CO_2, tanpa penerapan kebijakan pengendalian yang tepat, laju pertumbuhan emisi dari sektor ini tetap berisiko mengalami peningkatan yang signifikan (6).

Emisi CO_2 yang tinggi dalam proses produksi obat umumnya disebabkan oleh besarnya konsumsi energi listrik pada mesin-mesin yang digunakan (7). Tahapan produksi yang panjang dan kompleks memerlukan berbagai jenis peralatan, sehingga meningkatkan kebutuhan energi dan pada akhirnya berkontribusi terhadap tingginya emisi CO_2 (8). Salah satu tahapan yang berperan dalam peningkatan konsumsi energi tersebut adalah proses granulasi pada pembuatan tablet. Proses granulasi dalam industri farmasi, terutama granulasi basah, merupakan tahapan kritis yang memerlukan penggunaan peralatan berskala besar seperti *vertical granulation, fluid bed dryer,* dan *homogenizer* (9). Seluruh proses ini membutuhkan energi dalam jumlah besar, baik dalam bentuk listrik maupun panas, untuk memastikan homogenitas dan kestabilan produk granul (10). Tingginya konsumsi energi ini menghasilkan emisi CO_2 yang signifikan ke atmosfer (11). Konsumsi energi yang tinggi pada proses granulasi menjadi dasar pertimbangan perlunya evaluasi terhadap emisi CO_2 yang dihasilkan dari seluruh rangkaian tahapan granulasi.

Metode

Penelitian dilakukan dengan metode observasional-deskriptif pendekatan kuantitatif proses granulasi pada tablet Y di Pabrik X. Data yang digunakan merupakan data proses granulasi tablet Y dari bulan Januari hingga Desember 2024. Proses

produksi dilakukan dengan sistem batch, dengan total 68 batch yang dianalisis. Setiap batch diproduksi dengan kapasitas 845.000 kg massa granul dengan bobot satu tablet 650 mg sehingga setara 1.300.000 tablet per batch. Tablet Y terdiri dari zat aktif A, zat aktif B, dan eksipien C yang seluruhnya mengalami proses granulasi dalam tahap produksinya. Analisis data dilakukan dengan menghitung durasi seluruh proses granulasi dari tiap batch produksi kemudian menghitung konsumsi energi listrik (kWh) dari durasi tersebut dan mengkonversikannya pada emisi CO_2.

Tahapan pembuatan granul tablet Y yaitu penimbangan bahan baku, pencampuran awal, pengayakan awal, kemudian proses granulasi. Proses granulasi dimulai dengan *dry mixing* yaitu pencampuran beberapa material tanpa menggunakan larutan. Selanjutnya dilakukan *spraying* yaitu proses pembasahan material dengan larutan pengikat. Sebelum dilakukan *spraying,* dilakukan pembuatan larutan pengikat dengan menggunakan *liquid turbo mixer* yaitu alat pencampur berkecepatan tinggi dalam pembuatan larutan pengikat homogen. Larutan pengikat yang telah siap akan ditampung dalam *binder vessel 20L* sebelum disambungkan pada *vertical granulator*. *Binder vessel 20L* merupakan tangki *stainless steel* berkapasitas 20 liter sebagai penampung *binder* sebelum proses *sprying* dilakukan. Proses selanjutnya adalah *wet mixing*. *Wet mixing* merupakan pencampuran kembali menggunakan *impeller* dan *chopper* dalam granulator untuk membentuk granul basah yang kohesif dan homogen. Proses *wet mixing* dilakukan dengan menggunakan *vertical granulator glatt V*. Tahap selanjutnya adalah *drying material* yang terdiri dari *heating* dan *cooling. Heating* dilakukan dengan udara panas untuk menguapkan larutan granul basah hingga tercapai RH yang ditetapkan. Pada proses *heating* digunakan *inlet air temperature* mencapai 80^0C dan *air flow volume* 2500 m^3/h. Lalu tahap *cooling* menurukan suhu partikel padat setelah proses pengeringan dan menghilangkan panas berlebih yang tersisa dalam sistem dan mencegah degradasi material. Tahap *drying material* dilakukan menggunakan *fluid bed dryer glatt V.*

Seluruh proses granulasi menggunakan *glatt granulation line*. Sistem ini dilengkapi dengan ketahanan tekanan hingga 12 bar pada seluruh komponennya. Selain itu, *glatt granulation line* memiliki sistem SC *SuperClean*®, yaitu sistem pembersihan *Clean-in-Place* (CIP) otomatis penuh yang dapat divalidasi. Perpindahan produk atau transfer material dilakukan menggunakan *glatt rotor GS180* serta didukung oleh *glatt sieve*. Terdapat sistem kontrol *GlattView* untuk memastikan proses granulasi dan pengeringan berbasis *fluid bed system* berjalan secara terkendali dan konsisten.

Hasil

Produksi tablet Y pada Pabrik X di tahun 2024 tercatat sebanyak 68 batch. Proses granulasi pada tablet Y terdiri dari tiga tahapan utama, yaitu tahap pengolahan zat aktif A, tahap pengolahan zat aktif B, dan tahap pengolahan eksipien C yang merupakan eksipien tunggal. Masing-masing tahap memiliki proses granulasi dengan mesin granulator tersendiri sesuai karakteristik bahan yang digunakan. Zat aktif A dan B menggunakan *vertical granulation* dan *fluid bed dryer* sedangkan eksipien C hanya

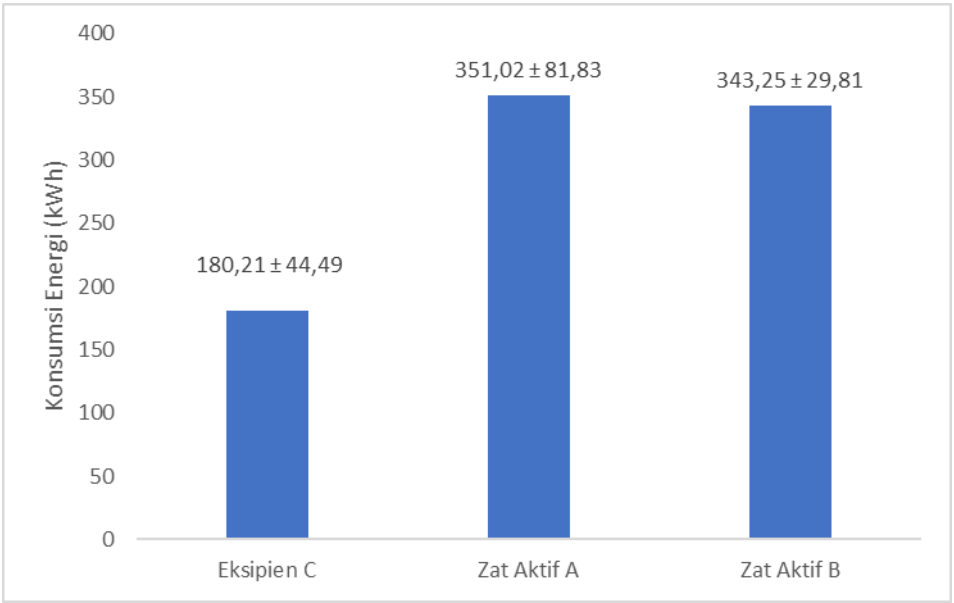
menggunakan *fluid bed dryer.* Masing-masing tahap pengolahan dihitung durasi pemakaiannya dengan melihat waktu mulai dan akhir penggunaan alat. Total durasi granulasi pada tablet Y dapat dilihat pada Tabel 1. Penyajian urutan nomor batch dalam Tabel 1 dilakukan secara kronologis berdasarkan penomoran batch dari nomor terkecil hingga terbesar sesuai dengan urutan pelaksanaan produksi tablet Y.

Tabel 1. Durasi Proses Granulasi Tablet Y

Bulan	No. Batch	Durasi Proses Granulasi (Jam)			
		Eksipien C	Zat Aktif A	Zat Aktif B	Total
Januari	XXXXX22	2,59	17,79	6,37	26,75
	XXXXX77	4,54	5,81	6,33	16,68
Februari	XXXXX10	3,96	6,26	6,32	16,54
April	XXXXX59	3,61	8,27	6,08	17,95
	XXXXX60	2,54	8,04	6,67	17,24
	XXXXX55	3,55	6,76	6,45	16,76
	XXXXX72	2,55	6,41	5,91	14,87
	XXXXX73	2,78	6,28	6,73	15,79
	XXXXX73	3,17	6,52	7,97	17,66
Mei	XXXXX18	4,33	6,12	6,06	16,51
	XXXXX50	3,57	6,08	6,25	15,89
	XXXXX51	4,17	7,07	7,79	19,03
	XXXXX58	3,53	5,78	6,14	15,45
	XXXXX31	3,28	6,30	6,19	15,77
	XXXXX73	3,11	5,93	6,27	15,30
	XXXXX74	2,83	6,16	6,21	15,20
	XXXXX75	4,68	6,47	6,65	17,80
	XXXXX76	2,94	6,21	6,37	15,52
	XXXXX78	4,28	6,39	6,59	17,26
	XXXXX75	4,24	5,91	6,26	16,42
	XXXXX87	2,92	5,86	6,48	15,26
Juni	XXXXX86	5,46	5,81	5,84	17,11
	XXXXX62	5,57	5,56	5,95	17,08
	XXXXX63	5,54	5,81	6,01	17,36
	XXXXX64	6,04	6,01	6,11	18,17
	XXXXX16	3,21	6,26	6,19	15,66
	XXXXX35	2,79	5,72	5,99	14,50
	XXXXX79	2,91	5,41	6,18	14,51
	XXXXX20	3,14	6,45	8,66	18,24
Juli	XXXXX15	2,40	6,46	5,73	14,59
	XXXXX17	2,63	5,86	6,11	14,61
	XXXXX97	2,64	6,04	5,76	14,44
	XXXXX83	3,22	5,57	5,73	14,52
	XXXXX92	2,32	6,60	6,65	15,57
	XXXXX93	2,75	6,08	5,89	14,71
Agustus	XXXXX94	3,32	5,94	6,00	15,26
	XXXXX29	3,18	5,99	6,11	15,28
	XXXXX42	2,56	6,42	5,80	14,78
	XXXXX63	3,05	5,55	5,48	14,08
	XXXXX64	3,11	5,97	5,92	15,00
	XXXXX65	3,12	7,00	6,40	16,52
	XXXXX66	2,94	6,24	5,88	15,06
September	XXXXX64	3,08	6,42	5,88	15,37
	XXXXX00	3,39	6,09	5,47	14,95
	XXXXX01	4,55	6,20	6,16	16,91
	XXXXX06	2,96	6,04	6,34	15,35
	XXXXX72	2,82	5,49	7,04	15,35
	XXXXX48	2,71	6,21	6,33	15,24

Oktober	XXXXX49	2,32	6,66	5,89	14,87
	XXXXX24	2,79	6,59	5,86	15,24
	XXXXX26	2,70	6,03	6,38	15,12
	XXXXX28	2,86	5,79	6,20	14,85
	XXXXX42	3,06	6,09	5,80	14,95
	XXXXX59	2,94	6,55	7,06	16,55
	XXXXX26	3,26	5,34	5,85	14,45
	XXXXX27	2,83	5,89	5,51	14,23
	XXXXX29	3,14	6,27	5,69	15,10
	XXXXX32	2,95	6,48	5,89	15,31
	XXXXX33	3,27	6,70	6,35	16,31
	XXXXX16	2,83	5,82	5,74	14,39
	XXXXX48	3,15	6,39	5,96	15,50
November	XXXXX70	2,23	6,16	6,10	14,48
	XXXXX72	2,94	5,98	6,69	15,61
	XXXXX37	2,84	6,48	6,78	16,11
	XXXXX38	3,05	6,19	6,53	15,77
	XXXXX45	2,68	6,15	6,50	15,33
	XXXXX78	3,48	6,27	5,87	15,61
Desember	XXXXX80	2,90	6,54	6,03	15,47
Rata-rata Durasi ± SD		3,28 ± 0,81	6,38 ± 1,49	6,24 ± 0,54	15,90 ± 1,74

Berdasarkan Tabel 1, rata-rata proses pengolahan eksipien C sebesar 3,28 ± 0,81 jam, zat aktif A 6,38 ± 1,49 jam, zat aktif B 6,24 ± 0,54 jam, dengan total durasi yang dibutuhkan dari proses granulasi untuk satu batch adalah 15,90 ± 1,74 jam. Konsumsi energi proses pengolahan mencapai 55 kWh per jam dengan total kWh dari masing-masing pengolahan dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Konsumsi Energi (kWh) Proses Granulasi

Tahap pengolahan granulasi yang memiliki konsumsi energi tertinggi hingga terkecil secara berturut-turut adalah pengolahan zat aktif A 351,02 ± 81,83 kWh; zat aktif B 343,25 ± 29,81 kWh; eksipien C 180,21 ± 44,49 kWh dengan total konsumsi energi proses granulasi dalam satu batch adalah 874,44 ± 95,49 kWh. Besarnya konsumsi energi pada pengolahan zat aktif A dan B disebabkan oleh pengolahannya menggunakan dua mesin granulator sedangkan untuk eksipien C hanya menggunakan salah satunya.

Konsumsi energi yang digunakan pada proses granulasi kemudian dilakukan konversi pada emisi CO_2. Konversi emisi CO_2 dilakukan dengan melihat intensitas karbon pembangkit listrik yaitu jumlah gram CO_2 (gCO_2) yang dihasilkan untuk setiap 1 kilowatt-hour (kWh) listrik. Intensitas karbon pembangkit listrik tersebut memiliki angka yang berbeda-beda untuk setiap negaranya. Berdasarkan *Our World Data*, Indonesia pada tahun 2023 memiliki intensitas karbon pembangkit listrik sebesar 682 gCO_2/kWh (12). Total konsumsi energi proses granulasi dalam satu batch adalah 874,44 ± 95,49 kWh, sehingga emisi CO_2 yang dihasilkan sebesar 596.409 g/batch.

Pembahasan

Granulasi merupakan salah satu metode yang umum diterapkan dalam manufaktur sediaan solid farmasi karena mampu memperbaiki karakteristik bahan aktif farmasi (API) serta premiksnya (campuran kering) sebelum diproses lebih lanjut menjadi sediaan obat. Proses granulasi menghasilkan granul dengan ukuran partikel yang lebih besar sehingga meningkatkan sifat alir, keseragaman kadar, kemampuan kompresi, serta konsistensi profil pelepasan obat (13). Proses granulasi dibagi menjadi dua jenis yaitu granulasi basah dan granulasi kering. Granulasi basah menggunakan cairan pengikat pada tahapannya sedangkan granulasi kering tidak memerlukan cairan (14).

Pada proses granulasi, granul dihasilkan melalui pengolahan bahan menggunakan mesin granulator. Melalui tahapan aglomerasi, pemadatan, dan penggabungan partikel, mesin granulator mengubah partikel-partikel berukuran kecil menjadi granul dengan ukuran yang lebih besar (15). Jenis-jenis mesin granulator diantaranya adalah *disk granulator*, *fluid bed granulator*, *roller compactor*, *mixer granulator*, *centrifugal granulator*, *high shear mixer granulator*, *extruder spheronizer*, dan *chilsonator* (16).

Proses granulasi pada Pabrik X menggunakan mesin granulator *fluid bed dryer* dan *vertical granulator* atau biasa diketahui sebagai *high shear granulator*. *High Shear Wet Granulation* (HSWG) merupakan teknologi pengembangan granul yang paling umum digunakan dan melibatkan tahapan pencampuran kering bahan serbuk, penambahan cairan pengikat pada kecepatan impeller serta chopper yang rendah, kemudian proses *wet massing* dengan kecepatan tinggi sesuai kebutuhan produk. Aliran serbuk terbentuk melalui transfer momentum dari impeller yang dilanjutkan oleh tumbukan antar partikel maupun dengan dinding peralatan. Metode HSWG memiliki sejumlah keunggulan seperti kualitas pencampuran yang baik, waktu proses singkat, efisiensi tinggi, kapasitas muat obat besar, konsumsi energi rendah, pengurangan debu, serta proses yang berlangsung dalam sistem tertutup, sehingga mendukung pengembangan proses kontinu. Namun demikian, HSWG memiliki keterbatasan berupa potensi degradasi kimia pada bahan yang sensitif panas, kerusakan mekanik pada partikel rapuh, serta risiko terbentuknya gumpalan akibat pembasahan berlebih (17). Sedangkan *Fluid bed granulator* merupakan mesin granulator multifungsi yang digunakan dalam industri farmasi untuk melakukan proses granulasi basah, pencampuran, dan pengeringan dalam satu sistem terpadu. Pada proses ini, bahan awal di fluidisasi menggunakan aliran udara panas, kemudian larutan pengikat

disemprotkan untuk membentuk aglomerat hingga diperoleh ukuran dan kadar lembab granul yang diinginkan, sebelum akhirnya dikeringkan kembali hingga mencapai kondisi akhir yang stabil. Teknologi ini dipengaruhi oleh berbagai parameter penting seperti kecepatan penyemprotan, ukuran droplet, suhu proses, serta laju aliran udara. *Fluid bed granulator* mampu menghasilkan granul yang lebih homogen, bebas debu, mudah mengalir, dan memiliki kekompakan serta kekuatan yang lebih tinggi dibanding metode granulasi basah konvensional, sehingga memungkinkan produksi tablet yang stabil dan mudah larut (18).

Pabrik X dalam pembuatan tablet Y menggunakan kombinasi mesin granulator *high shear granulator* yaitu *vertical granulator* dan *fluid bed granulator*. *Vertical granulator* digunakan pada tahap *dry mixing, spraying* larutan granul, *inertization,* dan *wet mixing* sedangkan *fluid bed granulator* digunakan untuk pemanasan dan pengeringan (19). Kombinasi penggunaan kedua teknologi tersebut mampu menghasilkan granul basah yang padat serta terkontrol secara efisien sekaligus siklus pengeringan yang cepat melalui *fluid bed dryer* (20). Pengolahan zat aktif A dan zat aktif B menggunakan kedua mesin granulator sedangkan pada eksipien C hanya menggunakan salah satunya. Pada eksipien C, hanya digunakan *fluid bed dryer* untuk pemanasan dan pengeringan. Hal tersebut dikarenakan ukuran partikel eksipien C sudah memiliki laju alir yang baik namun masih memiliki *moisture content* sehingga tetap diperlukan mesin granulator sebagai pengering sebelum dilakukan pencampuran dengan zat aktif A dan B (21). Sedangkan pada zat aktif A dan B diperlukan dua mesin granulator yaitu sebagai penambahan larutan granulasi pada mesin *vertical granulator* dan pengeringan digunakan dengan *fluid bed dryer.* Kedua mesin tersebut diperlukan untuk memperbaiki sifat laju alir yang buruk pada zat aktif A dan B (22).

Pemakaian kombinasi mesin granulator menyerap kebutuhan energi listrik yang cukup tinggi. Sumber energi listrik di Indonesia masih menggunakan bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam sehingga penggunaan bahan bakar fosil tersebut menyebabkan tingginya emisi CO_2 yang dihasilkan (23). Berdasarkan *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), dampak emisi CO_2 terhadap pemanasan global dinilai dari besarnya akumulasi emisi CO_2 di tingkat global. Dengan demikian, penilaian emisi CO_2 dari suatu kegiatan produksi dilakukan dengan melihat kontribusinya terhadap total emisi CO_2 global (24). Hasil dari evaluasi diketahui bahwa energi listrik yang dibutuhkan untuk proses granulasi tablet Y di Pabrik X pada tahun 2024 mencapai 874,44 ± 95,49 kWh per batch dengan total durasi 15,90 ± 1,74 jam. Total batch produksi di tahun tersebut mencapai 68 batch sehingga pemakaian energi listrik dalam tahap granulasi tablet Y selama satu tahun mencapai 59.466 kWh. Pada penelitian yang dilakukan oleh Barriga *et al.,* (2023), rata-rata penggunaan mesin granulator *fluid Bed dryer* pada satu batch atau setara 150 kg diperlukan durasi pengeringan selama 300 menit (5 jam) (25). Jika dibandingkan dengan hasil evaluasi pada Pabrik X, proses pengeringan eksipien C pada satu batch atau setara 170.000 kg menggunakan *fluid bed dryer* hanya memerlukan durasi selama 3,28 ± 0,81 jam. Data tersebut menunjukkan penggunaan energi listrik pada *fluid bed dryer* pada satu batch produk di Pabrik X, 34,4% lebih rendah dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan Barriga *et al.,* (2023). Meskipun durasi pengeringan eksipien C di Pabrik X menunjukkan pemakaian energi listrik 34,4% lebih rendah, perbedaan ini dapat terjadi

karena karakteristik fisik dan kimia tiap bahan yang dikeringkan tidak sama. Faktor seperti ukuran partikel dan kemampuan menyerap panas berpengaruh langsung terhadap laju perpindahan massa dan panas di dalam *fluid bed dryer* (26).

Energi listrik yang digunakan apabila berasal dari bahan bakar fosil akan berkontribusi terhadap emisi CO_2 (27). Total emisi CO_2 pada penggunaan bahan bakar fosil dan industri di Indonesia pada tahun 2024 sebesar 812,22 juta ton. Angka tersebut menyumbang 2,1% emisi CO_2 dunia dan 3,47% emisi CO_2 benua asia (28). Proses granulasi tablet Y di Pabrik X menyumbang emisi CO_2 sebesar 596.409 g/batch dan 40,5 ton/tahun. Nilai tersebut menunjukkan kontribusi emisi CO_2 yang relatif kecil dan dapat dinilai cukup baik dibandingkan dengan total emisi CO_2 nasional. Meskipun demikian, upaya reduksi emisi CO_2 di lingkungan industri memiliki peranan yang penting untuk mendukung pengurangan emisi secara bertahap, meningkatkan efisiensi proses produksi, serta berkontribusi pada pencapaian target penurunan emisi nasional (29).

Upaya pengurangan emisi CO_2 di industri farmasi dapat dilakukan melalui optimalisasi proses granulasi. Optimalisasi proses granulasi meliputi pengaturan suhu pengeringan agar tidak melebihi kebutuhan minimal proses serta pengendalian laju alir udara yang disesuaikan dengan kebutuhan pengeringan bahan agar tidak ada yang melebihi kebutuhan karakteristik bahan. Dapat dilakukan pula pengendalian durasi tiap tahap granulasi untuk mencegah penggunaan energi yang berlebihan. Pengendalian durasi tahap granulasi dapat dilakukan dengan menetapkan waktu standar pada tiap tahapan proses granulasi, pelatihan operator dalam memahami tiap proses dan disiplin dalam operasional, serta perubahan desain alur proses untuk meningkatkan efisiensi energi (30). Selain itu, strategi dalam pengolahan limbah dapat memiliki peran dalam mereduksi emisi CO_2 dengan mengurangi limbah yang dihasilkan dari proses manufaktur serta peningkatan daur ulang limbah (31). Peralihan sumber energi dari bahan bakar fosil ke sumber terbarukan seperti biogas, juga dapat dilakukan untuk mereduksi emisi CO_2 secara signifikan (32).

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa proses granulasi pada produksi tablet Y di Pabrik X memberikan kontribusi emisi karbon dioksida (CO_2) sebesar 596.409 g/batch setara 40,5 ton/tahun. Hasil evaluasi mengindikasikan bahwa penggunaan kombinasi mesin granulator pada proses granulasi menjadi sumber konsumsi energi terbesar sehingga menghasilkan emisi CO_2 yang signifikan. Temuan ini menegaskan bahwa proses granulasi merupakan salah satu titik kritis dalam rantai produksi yang memiliki potensi besar terhadap pembentukan emisi. Oleh karena itu, diperlukan upaya optimalisasi proses granulasi yaitu pengaturan suhu pengeringan agar tidak melebihi kebutuhan minimal proses, pengendalian laju alir udara yang disesuaikan dengan kebutuhan pengeringan bahan, pengendalian durasi tiap tahap granulasi untuk mencegah penggunaan energi yang berlebihan. Pengendalian durasi granulasi dapat dilakukan dengan cara penetapan waktu standar pada tiap tahap proses granulasi dan

pelatihan operator dalam memahami tiap proses dan disiplin dalam operasional. Selain itu, dapat dilakukan perbaikan desain alur proses untuk meningkatkan efisiensi energi, pengolahan limbah manufaktur, serta peralihan sumber energi terbarukan untuk menurunkan emisi CO_2.

Daftar Pustaka

1. Kurniawan J, Razak A, Syah N, Diliarosta S, Azhar A. Pemanasan global: faktor, dampak dan upaya penanggulangan. INSOLOGI: Jurnal Sains dan Teknologi. 2024;3(6):646-655.
2. Agnesia Y, Fitri JA. Perubahan Iklim Dan Dampaknya Pada Kesehatan Lingkungan. Biomedical and Environmental Health Technology. 2025;2(1):19-25.
3. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [diunduh 19 November 2025]. Tersedia dari: https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/
4. Global Carbon Atlas. Global Carbon Atlas [diunduh 19 November 2025]. Tersedia dari: https://globalcarbonatlas.org/emissions/land-use/
5. Nainggolan H, Nuraini R, Sepriano S, Aryasa IWT, Meilin A, Adhicandra I, dkk. Green technology innovation: Transformasi teknologi ramah lingkungan berbagai sektor. PT Sonpedia Publishing Indonesia; 2023.
6. Pradoto W, Labiba D. 2018. Sebaran emisi CO2 dan implikasinya terhadap penataan ruang area industri di Kabupaten Kendal. Jurnal Pengembangan Kota. 2018;6(2):164-173.
7. Saidal SMM, Mar M. Pencemaran Udara dan Emisi Gas Rumah Kaca. Kreasi Cendekia Pustaka; 2020.
8. Siswanto BN, Agus RMP, Yuliawati AK, Alfira SST. Strategic Sustainability Advantage: Green Innovations in Pharma Supply Chains. PT Kimhsafi Alung Cipta; 2025.
9. Tan BX, Foo WC, Chow KT, Gokhale R. Advances in Wet granulation of modern drugs. Handbook of Pharmaceutical Granulation Technology: 2021.
10. Samsuri M, Widodo H, Choirunnisa AS. Analisa Efisiensi Energi pada Proses Produksi Obat X di Perusahaan YZ. Jurnal Bhara Petro Energi. 2022;17-25.
11. Pangestu RCK, Ayuningsasi AAK. Pengaruh Konsumsi Energi Sektor Industri, Rumah Tangga, dan Transportasi terhadap Emisi Karbon di Indonesia. Inisiatif: Jurnal Ekonomi, Akuntansi dan Manajemen. 2024;3(4):297-311.
12. Ember. Energy Institute - Statistical Review of World Energy (2025) – with major processing by Our World in Data [diunduh 19 November 2025]. Tersedia dari: https://archive.ourworldindata.org/20251014-145858/grapher/carbon-intensity-electricity.html
13. Hiremath P, Nuguru K, Agrahari V. In Handbook of pharmaceutical wet granulation Academic Press; 2019.
14. Shanmugam S. Granulation techniques and technologies: recent progresses. BioImpacts. 2015; 5(1):55–63.

15. Nakamura H, Baba T, Ohsaki S, Watano S, Takehara K, Higuchi T. Numerical simulation of wet granulation using the DEM–PBM coupling method with a deterministically calculated agglomeration kernel. Chemical Engineering Journal. 2022;450:138298.
16. Indratmoko S, Aji AP. Teknologi Sediaan Solid. UNAIC Press Cilacap; 2023.
17. Liu B, Wang J, Zeng J, Zhao L, Wang, Y, Feng Y, Du R. A review of high shear wet granulation for better process understanding, control and product development. Powder Technology. 2021;381:204-223.
18. Zaelani D, Wardhana YW, Chaerunisaa AY. Process Of Fluid Bed Granulator Parameters At The Time Of Scale Up In Granul Production. Medical Sains: Jurnal Ilmiah Kefarmasian. 2023:8(3):955-962.
19. Arndt OR, Baggio R, Adam AK, Harting J, Franceschinis E, & Kleinebudde P. Impact of different dry and wet granulation techniques on granule and tablet properties: a comparative study. Journal of pharmaceutical sciences. 2018;107(12):3143-3152.
20. Parikh DM. Handbook of pharmaceutical granulation technology. Drugs and the pharmaceutical sciences; 2005.
21. Riyanti KMP, Rohmani S. 2018. Pengaruh Variasi Konsentrasi Avicel PH 102 Dengan Dikalsium Fosfat Anhidrat Sebagai Fillerbinder Terhadap Sifat Fisik Tablet Vitamin C. In Prosiding APC (Annual Pharmacy Conference). 2018;3(1).
22. Kenekar VV, Ghugare SB, Patil-Shinde V. Multi-objective optimization of high-shear wet granulation process for better granule properties and fluidized bed drying characteristics. Powder Technology. 2023;420:118-373.
23. Alnavis NB, Wirawan RR, Solihah KI, & Nugroho VH. Energi listrik berkelanjutan: Potensi dan tantangan penyediaan energi listrik di Indonesia. Journal of Innovation Materials, Energy, and Sustainable Engineering. 2024;1(2).
24. Eggleston HS, Miwa K, Srivastava, N, & Tabane K. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories; 2008.
25. Barriga R, Romero M, Hassan H, & Nettleton DF. Energy Consumption Optimization of a Fluid Bed Dryer in Pharmaceutical Manufacturing Using EDA (Exploratory Data Analysis). Sensors. 2023;23(8):3994.
26. Askarishahi M, Salehi MS, & Radl S. Challenges in the simulation of drying in fluid bed granulation. Processes, 2023;11(2):569.
27. Liddle B, Sadorsky P. How much does increasing non-fossil fuels in electricity generation reduce carbon dioxide emissions?. Applied energy. 2017;197:212-221.
28. Global Carbon Budget. Annual CO2 Emissions 2024 [diunduh 19 November 2025]. https://ourworldindata.org/co2-emissions
29. Nainggolan H, Nuraini R, Sepriano S, Aryasa IWT, Meilin A, Adhicandra I, dkk. Green technology innovation: Transformasi teknologi ramah lingkungan berbagai sektor. PT Sonpedia Publishing Indonesia; 2023.
30. Majumder P, Deb B, Gupta R, Sablani SS. A comprehensive review of fluidized bed drying: Sustainable design approaches, hydrodynamic and thermodynamic performance characteristics, and product quality. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022;53:102643.

31. Booth A, Jager A, Faulkner SD, Winchester CC, & Shaw SE. Pharmaceutical company targets and strategies to address climate change: content analysis of public reports from 20 pharmaceutical companies. International journal of environmental research and public health. 2023;20(4):3206.
32. Khan IU, Mohd HDO, Haslenda H, Matsuura T, Ismail AF, Rezaei-Dashtarzhandi M, Azelee IW. Biogas as a renewable energy fuel-a review of biogas upgrading, utilisation and storage. 2017;150: 227-294.

© 2026 di penulis. Majalah Farmasetika (ISSN : 2686-2506) berlisensi dibawah Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0). Majalah Farmasetika menerima karya ilmiah di bidang farmasetika di alamat http://jurnal.unpad.ac.id/farmasetika/.