

Perancangan *Blade* dan Pengembangan Prototipe *Tangensial Drum* Mesin *Roasting Kopi*

Bolo Dwiartomo*, Yoseph Andriyanto, Wahyudi Purnomo, Ayi Ruswandi

Politeknik Manufaktur Bandung
Jl. Kanayakan No. 21, Dago, Bandung
*Email: bdwiartomo@gmail.com

Diterima: 18-06-2021; Direvisi: 27-04-2022; Dipublikasi: 30-04-2022

Abstrak

Kopi Arabika yang tumbuh di dataran tinggi beriklim tropis memiliki nilai ekonomi tinggi bila diproses dengan standart kualitas baik. Salah satu pengolahan paska panen yang sangat menentukan terhadap aroma, cita rasa dan homogenitas warna adalah proses roasting. Salah satu bagian terpenting pada mesin roasting adalah drum. Terdapat dua jenis, rotary drum dan tangensial drum. Pengembangan dilakukan pada tangensial drum di mana dinding drum diam sebagai stator dan blade berputar sebagai rotor. Proses perpindahan panas terjadi secara konveksi, sehingga dihasilkan proses peroastingan yang homogen dan merata secara konsisten dibandingkan tipe rotary drum berkonstruksi sederhana. Blade melekat pada dinding drum dan berputar bersama. Perpindahan panas terjadi secara konduksi, labil terhadap hasil akhir sehingga membutuhkan seorang profesional roastery untuk mengoperasikan. Tangensial drum membutuhkan akurasi dinamik tinggi pada gap antara dinding dengan blade, idealnya 1 ± 0.5 mm di seluruh permukaan. Industri dalam negeri belum mampu menghasilkan drum tipe tangensial secara komersial. Pabrik terkemuka duniapun hanya menghasilkan mesin roasting tipe tangensial drum berkapasitas besar 10 kg atau lebih dengan peruntukan industri besar berharga jual sangat tinggi. Kebutuhan mesin roasting tangensial berkapasitas relatif kecil yang mudah dioperasikan tanpa membutuhkan seorang roastery profesional sangat diperlukan untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat di sentra-sentra perkebunan kopi. Proses perancangan dilakukan secara reverse engineering. Detail drawing menggunakan perangkat lunak CAD membantu proses konversi bentang blade dari 3D menjadi penampang potong 2D berbahan plat stainlesssteel 304. Pengembangan ini menghasilkan prototipe blade tangensial dengan diameter drum 300 mm dalam dan panjang efektif 350 mm untuk kapasitas 2,5 kg greenbean. Pengujian dilakukan terhadap pengukuran gap dengan 75% sebaran hasil berada dalam rentang yang ditentukan dan performa blade melakukan agitasi biji kopi. Hasil pengujian laju pengeluaran kopi, aroma dan cita rasa yang berimbang serta homogenitas warna menunjukkan hasil baik.

Kata kunci: *blade; drum; reverse engineering; roasting; rotary; tangensial*

Abstract

Arabican Coffee which is growth in high land tropical country has potensial economic value when being processed by a proper standart quality. One of most important post harvest process is roasting which determine aroma, flavour and color homogeneity. The most important part of roasting machine is drum. There are two types of drum, rotary and tangensial drum. Research is focused on tangensial drum where as the drum surface is a stator and blade rotate as a rotor. Heat transfer process in drum from hot air to the coffee bean is convection. It will result a stable and consisten process showed by the color homogeneity of coffee bean. Rotary drum has a simple construction, blade is mounted in drum surface and rotate together. The heat transfer process on Rotary drum is conduction. It result is unstable and require a professional roastery as an operator. Tangensial drum needs highe accuracy gap between inner surface and blade, ideally 1 ± 0.5 mm along the drum surface. Local industry has not been ability to produce it commercially. The world leader coffee roasting manufacturing are only produce tangensial drum machine with capacity 10 kg or above which is aimed for big coffee industry which is very expensive. Actually, there are potensial requirement of this roasting machine with relatively small capacity around the coffee plantages area without the necessity of professional roastery. Design process uses reverse engineering approach. CAD software is utilized in order to get a detail drawing to convert 3D shape of blade to be 2D cutting surface of 304 stainlesssteel plate material. This applied research activity deliver tangensial blade prototype, fitting in 300 mm inner diameter. The effective length is 350 mm for 2.5 kg roasting capacity of greenbean coffee. Testing process of the prototype show the 75% measurement of sample point gap tolerance are in a desired tolerance. The performance of blade according to agitation process related to the speed of unloading of coffee bean, aroma, flavour balancing and the color homogeneity are resulted well.

Keywords: *blade; drum; reverse engineering; roasting; rotary; tangensial*

1. Pendahuluan

Drum adalah bagian utama dari sebuah mesin *coffee roasting*. Di bagian inilah biji kopi dalam bentuk *green bean* ditempatkan untuk dilakukan proses pemanggangan. Untuk menghasilkan rasa dan aroma terbaik, dibutuhkan proses perpindahan panas yang mencukupi di mana umumnya terjadi secara konveksi dan konduksi pada temperatur kerja drum yang telah ditentukan. Proses konveksi terjadi antara biji kopi dengan udara panas yang ada di sekitarnya dan konduksi terjadi antara biji kopi dengan dinding drum [1]. Terdapat dua jenis drum, *Rotary drum* di mana dinding drum berputar bersama biji kopi dan tangensial drum di mana dinding diam, tetapi di dalam drum terdapat *blade* berputar untuk mengagitasi biji kopi.

Rotary drum relatif hanya menghasilkan gaya sentrifugal pada biji kopi terhadap dinding. Pencampuran biji terjadi karena adanya gaya gravitasi saat biji terangkat ke atas dan dibantu dengan bentuk sudu-sudu yang dipasang permanen pada dinding untuk membantu proses pencampuran biji kopi [2]. Pada kecepatan putar rendah, biji kopi akan cenderung berada di bagian bawah drum. Bila kecepatan bertambah, posisi angkat biji kopi akan lebih tinggi dan akan jatuh kembali ke bagian bawah secara alami sehingga terjadi pencampuran biji dengan tingkat pemerataan tertentu. Pada kecepatan yang cukup tinggi, biji kopi akan cenderung menempel di seluruh dinding drum karena gaya sentrifugal yang dihasilkan cukup besar. Sturuktur mekanik dan proses pembuatannya pun relatif lebih sederhana karena dinding drum, *blade* dan poros sumbu putar merupakan satu bagian yang tidak terpisah, sehingga tidak memerlukan proses pengerjaan komponen dengan kepresisian tinggi dan penentuan titik pusat sumbu putar pada bagian tutup drum bagian depan dan belakangpun tidak membutuhkan toleransi pengukuran posisi yang presisi karena seluruh bagian drum akan berputar.

Pada tangensial drum, *blade* yang berputar dengan desain tertentu akan menghasilkan gaya radial sekaligus gaya tangensial secara aktif pada biji kopi, sehingga posisi biji kopi di dalam drum cenderung melayang dengan derajat kebebasan ditentukan oleh bentuk *blade* dan kecepatan putarnya. Perputaran drum berkecepatan rendah menjadikan pencampuran biji kopi lebih banyak bersentuhan dengan dinding. Pada kecepatan putar yang semakin tinggi, proses pencampuran biji akan semakin masif dan merata. Tangensial drum umumnya dikombinasikan dengan sistem aliran udara (*air flow*) secara kontinyu sehingga sering disebut *air roaster* [3]. Konstruksi mekanik tangensial drum menjadi kompleks karena terdapat dua bagian terpisah, yaitu: (1) dinding drum. Bagian ini diam yang dipasang terikat dengan bagian tutup depan dan belakang secara permanen dan (2) *blade* beserta poros putar. Bagian ini berputar mengelilingi dinding drum.

Mesin *roasting coffee* yang umum dan banyak diproduksi baik import maupun industri domestik adalah drum tipe rotari. Drum dengan tipe tangensial sangat terbatas dan berharga mahal karena konstruksi drum - *blade* yang cukup kompleks dengan kebutuhan kepresisian jarak yang konsisten antara dinding drum dan *blade* di seluruh permukaan. Mayoritas mesin *coffee roasting* dengan tipe tangensial drum pun lebih banyak diperuntukkan bagi skala industri dengan kapasitas di atas 10 kg. Mesin dengan kapasitas relatif kecil memiliki prospek yang baik, terutama diperuntukkan bagi usaha kecil menengah UMKM seperti kafe, produsen kopi skala rumah tangga dan para petani kopi sehingga mampu menghasilkan nilai tambah ekonomi dengan meningkatkan level pemrosesan kopi. Oleh karena itu penelitian dan pengembangan ini bertujuan untuk dapat merancang dan menghasilkan drum tipe tangensial dengan kapasitas pengolahan relatif kecil sampai dengan 2,5 kg agar dapat dikembangkan lebih lanjut menjadi produk standart yang berpotensi untuk digunakan oleh UMKM dan para petani kopi.

2. Material dan metodologi

Terdapat dua proses perpindahan panas ke biji kopi, konveksi dan konduksi [4]:

- 1) Konveksi, perpindahan panas terjadi antara udara panas di dalam drum ke biji kopi, besarnya adalah [5],

$$Q = h \cdot A \cdot (T_{udara} - T_{kopi}) \quad (1)$$

dimana,

Q : besarnya laju perpindahan panas konveksi

H : koefisien perpindahan panas konveksi antara permukaan biji kopi dan udara panas.

A : luas permukaan biji kopi.

T_{udara} : temperatur udara panas

T_{kopi} : temperatur permukaan biji kopi.

- 2) Konduksi, perpindahan panas terjadi antara dinding drum dengan biji kopi yang bersentuhan dengan drum dan antara biji kopi dengan biji kopi lain yang saling bersentuhan. Besarnya perpindahan panas konduksi adalah [5],

$$Q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

dimana,

Q : besarnya laju perpindahan panas konduksi.

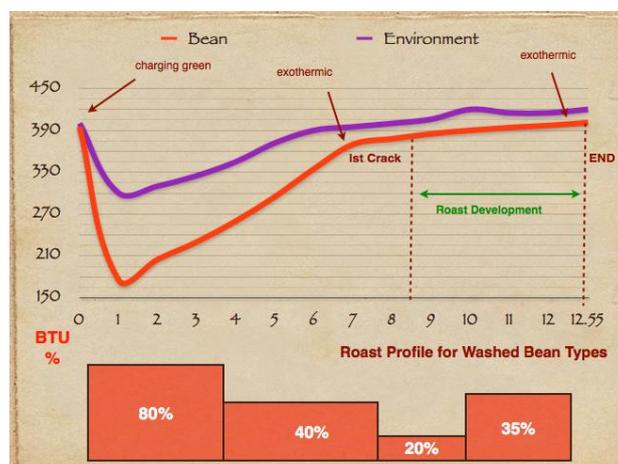
k : koefisien perpindahan panas konduksi.

A : luas permukaan penampang arah perpindahan panas dari biji kopi.

dT : *increment* perbedaan temperatur pada arah perpindahan panas.

dx : *increment* jarak pada arah perpindahan panas.

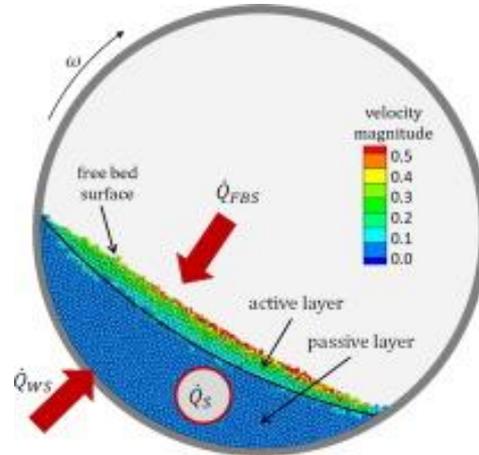
Kurva profiling roasting kopi sangat tergantung pada tingkat kematangannya, jenis *green bean* dan kadar airnya, serta karakter khusus yang akan dihasilkan. Contoh umum kurva *profiling* proses *roasting* untuk *medium roast* adalah seperti pada Gambar 1 [6].



Gambar 1. Contoh umum kurva *profiling roasting* kopi

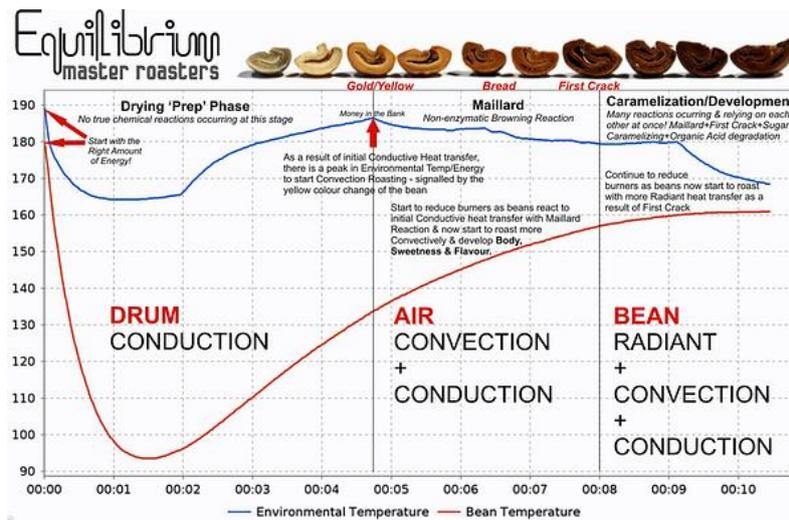
Proses *profiling* pada Gambar 1 dicapai dengan mengkombinasikan proses perpindahan panas secara konduksi dan/atau konveksi. Pada *Rotary drum* perpindahan panas mayoritas terjadi secara konduksi dikarenakan biji kopi lebih dominan bersentuhan dengan dinding drum. Proses konveksi hanya terjadi saat biji kopi jatuh dari bagian atas drum dengan ditambahkan sistem air flow. Range konveksi yang dihasilkan relatif cukup kecil pada range kecepatan putar yang cukup terbatas. Gaya terjadi dalam bentuk gaya centrifugal biji kopi ke dinding dan gaya gravitasi. Mayoritas pencampuran kopi berada di posisi 180° dinding drum sebelah bawah sehingga terdapat kecenderungan biji kopi saling bertumpuk, seperti terdapat pada Gambar 2 [8]. Pada saat bertumpuk nilai koefisien perpindahan panas konduksi k akan lebih kecil sehingga gradient dT/dx akan naik dengan naiknya selisih temperatur antara dinding drum dengan biji kopi

terjauh. Akibatnya temperatur di dekat dinding akan cenderung tinggi sehingga oksidasi biji kopi akan lebih besar yang akan berpengaruh terhadap kurang *balancenya* rasa dan kurang meratanya homogenitas kematangan kopi. Hal inipun menyebabkan biji kopi cenderung mudah menjadi gosong (*scorching*) dan matang tidak rata di permukaan biji (*tipping*) dengan kecenderungan menghasilkan rasa manis (*sweetness*) yang lebih [7], sehingga keahlian seorang roastery sangat menentukan hasil akhir.



Gambar 2. Proses pencampuran biji kopi pada Rotary drum

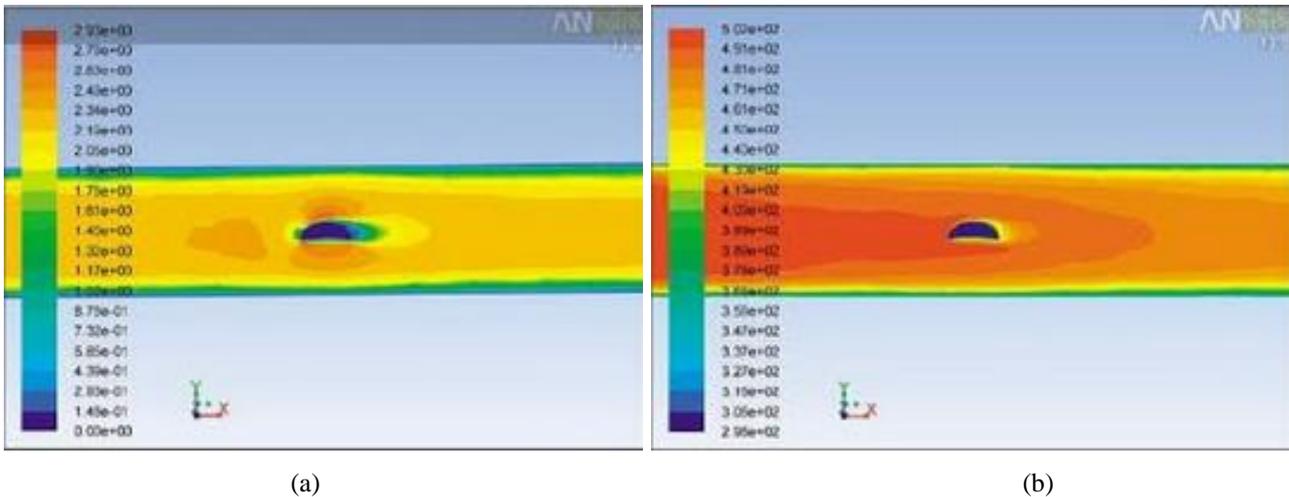
Proses *profiling* pada Rotary drum berdasarkan jenis perpindahan panasnya terlihat pada Gambar 3 [3].



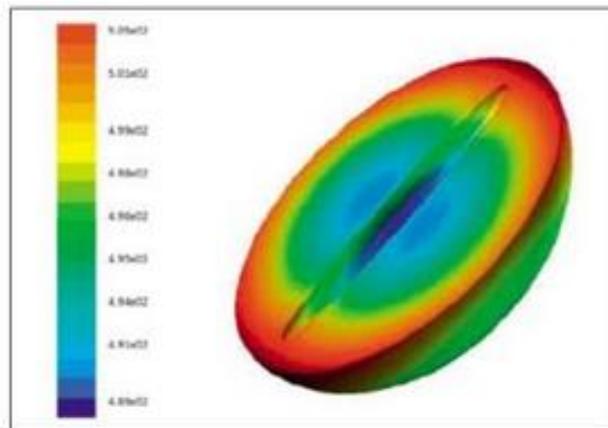
Gambar 3. Profiling proses roasting pada drum tipe rotary

Tangensial drum menghasilkan proporsi agitasi biji kopi secara centrifugal dan tangensial sehingga pencampuran dan distribusi posisi biji kopi yang merata di dalam drum (PROBAT-WERKE & GmbH, 2020). *Peroasting* menggunakan aliran udara panas sehingga mayoritas perpindahan panas yang terjadi adalah secara konveksi. Proses ini mampu menghasilkan rasa dan aroma yang lebih berimbang (*balance*) dan konsisten serta warna yang lebih merata dibandingkan *Rotary drum* [4]. Dengan tangensial drum, *profiling roasting* yang terdapat pada Gambar 3 dapat dipadukan secara lebih terukur melalui proses konduksi maupun konveksi. Besaran yang menjadi variabel dalam proses *profiling* ini adalah besarnya api (*flame*), debit aliran udara (*air flow*), putaran agitasi *blade* pada drum serta bukaan katup pelepas asap yang dimulai saat menjelang crack pertama (*first crack*).

Jika dilihat dari persamaan (1), besarnya perpindahan panas ditentukan oleh dua variabel utama, koefisien perpindahan panas konveksi h dan temperatur udara panas T_{udara} sekeliling biji kopi. Besarnya koefisien perpindahan panas h sangat ditentukan oleh profil aliran fluida di dalam drum. Bila *roasting* menggunakan udara panas (*hot air*), secara pemodelan terjadi proses distribusi profil kecepatan aliran fluida dan temperatur seperti pada Gambar 4 [9]. Bila sebuah biji kopi yang melayang di tengah-tengah drum akan dihasilkan distribusi temperatur pada biji kopi seperti pada Gambar 5.



Gambar 4. (a) Pemodelan distribusi kecepatan aliran udara di dalam drum. (b) Distribusi temperatur di dalam drum



Gambar 5. Distribusi temperatur pada biji kopi

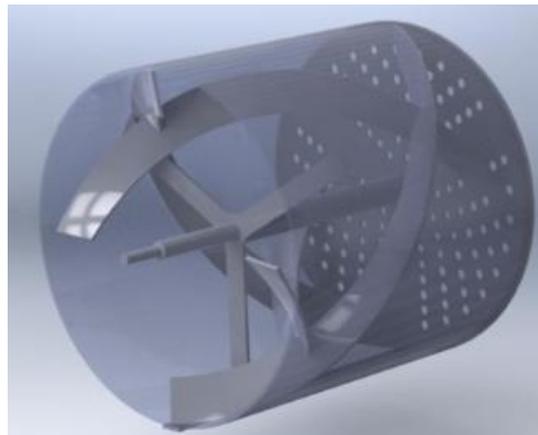
Untuk menghasilkan proses *profiling roasting* yang terukur baik waktu proses dan homogenitas kematangannya, posisi biji kopi di dalam drum seyogya berada di area posisi yang menghasilkan profil aliran udara dan temperatur yang sama. Hal ini tidaklah mungkin karena jumlah biji kopi umumnya menempati 1/3 bagian dari volume drum.

Proses rekayasa yang dapat dilakukan adalah,

- 1) Menggerakkan seluruh biji kopi sedapat mungkin agar saling terpisah dan secara rata-rata menempati posisi sebarang yang sama dan dalam jumlah waktu yang sama.
- 2) Mengubah profil aliran udara dan temperatur di dalam drum menjadi lebih homogen.

Hal tersebut lebih besar kemungkinan dapat dilakukan bila digunakan sistem tangensial drum, di mana peran *blade* sangat berpengaruh besar untuk melakukan proses rekayasa di atas. Homogenitas kematangan ini dapat dilihat dari tingkat

keseragaman warna biji kopi hasil proses *roasting*. Permasalahan utama pada sebuah tangensial drum adalah perancangan *blade* yang dapat menghasilkan efek pergerakan tangensial pada biji kopi. Pengembangan ini melakukan proses *reverse engineering* (rekayasa balik) [10] terhadap sebuah bentuk *blade* 3D yang telah dipublikasi dan disesuaikan bentuk dan dimensinya terhadap dimensi drum yang akan dirancang. Model yang telah diturunkan menjadi detail perancangan 3D, membutuhkan potongan *blade* dalam bentuk 2 dimensi untuk dapat dibuat prototipenya dari bahan dasar plat stainlesssteel 304 dengan tebal 2 mm. Kompleksifitas implementasi adalah menghasilkan gap mekanik sebesar 1 ± 0.5 mm. Bentuk dasar model 3D *blade* yang digunakan pada proses perancangan secara *reverse engineering* adalah pada Gambar 6 [11].



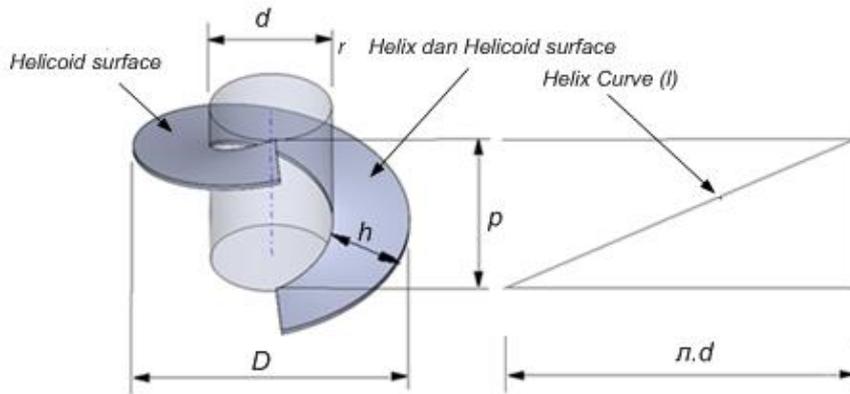
Gambar 6. Model 3D yang digunakan pada proses *reverse engineering*

Perancangan dilakukan dengan menentukan kapasitas pemrosesan *green bean* dan dimensi drum. Kapasitas *green bean* yang dapat diroasting pada drum ditentukan maksimum 2,5 kg sehingga didapat dimensi netto drum untuk mengolah *green bean* adalah berbentuk silinder dengan diameter dalam 300 mm dan panjang 350 mm. Lebar *blade* ditentukan 40 mm. Rancangan *blade* yang memiliki kemampuan mendorong biji kopi secara tangensial dan translasi sepanjang sumbu drum, memiliki bentuk dasar *helix*, *helix* merupakan bentuk kurva 3D melingkar/spiral seperti uliran pada sebuah baut. Bentuk *helix* dapat dibangun dengan cara melilitkan kawat/benang pada sebuah pipa silinder yang memiliki diameter (d) dan jarak satu lilitan spiral disebut *Pitch* (p). Panjang kurva lilitan spiral *helix* (l) dapat dihitung dengan rumus segitiga Phitagoras [12].

Dimana sisi alas segitiga merupakan keliling lingkaran pipa ($\pi \cdot d$) dan tinggi segitiga adalah jarak satu lilitan /*pitch* (p), maka panjang kurva helik (l) untuk satu lilitan [13], dimana d adalah diameter poros *blade* dalam mm dan p adalah jarak puncak 1 lilitan spiral *helix* / *Pitch* dalam mm.

$$l = \sqrt{((\pi \cdot d)^2 + p^2)} \quad (3)$$

Bentuk *blade* secara utuh merupakan permukaan datar dengan lebar $h = (D-d)/2$ yang di bentuk secara radial dan tangensial mengikuti bentuk *helix* tersebut, bentuk ini disebut *helicoidal surface* (*helicoid*) seperti pada Gambar 7. Bentuk *helicoid surface*, merupakan bentuk surface seperti silinder, *cones*, piramida yang dibuat atau dibentuk dari lembaran sheet metal yang dapat dibentangkan atau dibuka tanpa terjadi tarikan atau pengerutan (*stretching*) pelat seperti halnya pada proses *deep drawing*, *Surface* yang dapat dibentangkan atau *developable* umumnya dibentuk dengan proses *bending* atau penekukan [14].



Gambar 7. Helix dan Helicoid Surface

Secara matematis proses bentangan merupakan pemetaan busur kurva, dari tiap-tiap segmen surface dalam ruang isometri (3D) kedalam ruang bidang 2D. Proses bentangan 3D menjadi 2D ini bisa dilakukan secara grafis atau analitis. Secara grafis relatif lebih rumit dan kurang teliti. Sehingga banyak digunakan metoda perhitungan/analitis. Untuk tujuan pembuatan *blade*, dibutuhkan data plat *blade* awal sebelum dibentuk, Untuk membentangkan bentuk *blade helix* 3D menjadi bentuk bukaan/pelat 2 D seperti Gambar 8, dapat dihitung sebagai berikut.

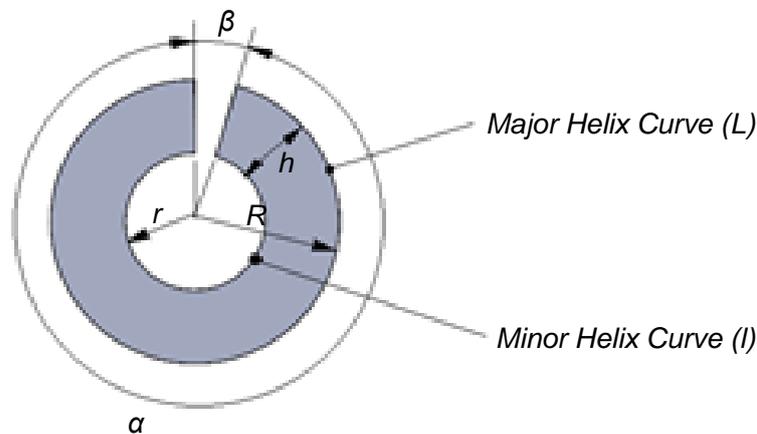
Panjang kurva *helix major* (L) untuk satu lilitan [13],

$$L = \sqrt{((\pi \cdot D)^2 + p^2)} \quad (4)$$

Dimana :

D : Diameter luar *blade (drum)* (mm)

p : puncak 1 lilitan spiral *helix* / Pitch (mm)



Gambar 8. Bentangan/bukaan *blade* 2D

Perbandingan panjang kurva *helix major* dan kurva *helix minor*, sebanding dengan perbandingan besar radius bukaan luar *blade* 2D (R) dan radius bukaan dalam *blade* 2D (r), yang dapat ditulis sebagai berikut.

$$L / l = R / r \quad \text{dan} \quad r = R - h$$

$$R = \frac{(L \cdot h)}{(L - l)} \quad (5)$$

$$r = R - h \quad (6)$$

Dimana :

L : Panjang kurva *helix major* (mm)

- l : Panjang kurva *helix minor* (mm)
 h : Lebar *blade* (mm)
 R : Radius bukaan luar (mm)
 r : Radius bukaan dalam (mm)

Sudut bukaan (β) dapat diperoleh Catatan : persamaan (3) dan (4) berlaku untuk satu putaran *helix* atau satu pitch.

$$a = \frac{L}{R} = \frac{l}{r} \quad (\text{rad}) \quad (7)$$

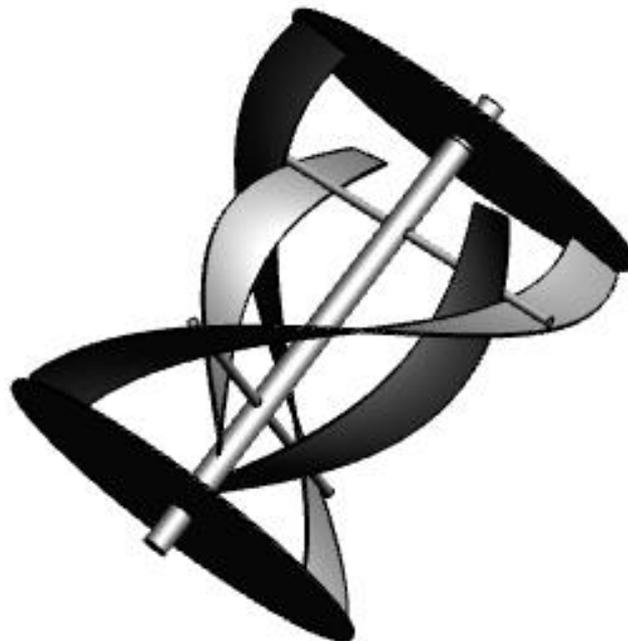
$$\beta = 360 \text{ deg} - a \quad (\text{deg}) \quad (8)$$

Dengan adanya parameter Radius luar dan dalam bukaan, diameter luar (DR) dan diameter dalam bukaan (dr) dapat ditentukan. Cara lain untuk mendapatkan bentuk profil bukaan 2D *blade* dengan cepat dan teliti, adalah dengan menggunakan piranti lunak atau *computer aided design (CAD) software* [15]. Software CAD yang dapat digunakan antara lain; AutoCAD, Inventor atau solidworks. Pada umumnya piranti lunak rekayasa yang berorientasi untuk manufaktur/mechanical engineering dilengkapi fitur membuat kurva *helix* 3D, dengan tersedianya data design diameter poros *blade* (d), diameter luar *blade*/drum (D) dan jarak pitch (p), maka bentuk kura *helix* 3D dapat dibentuk.

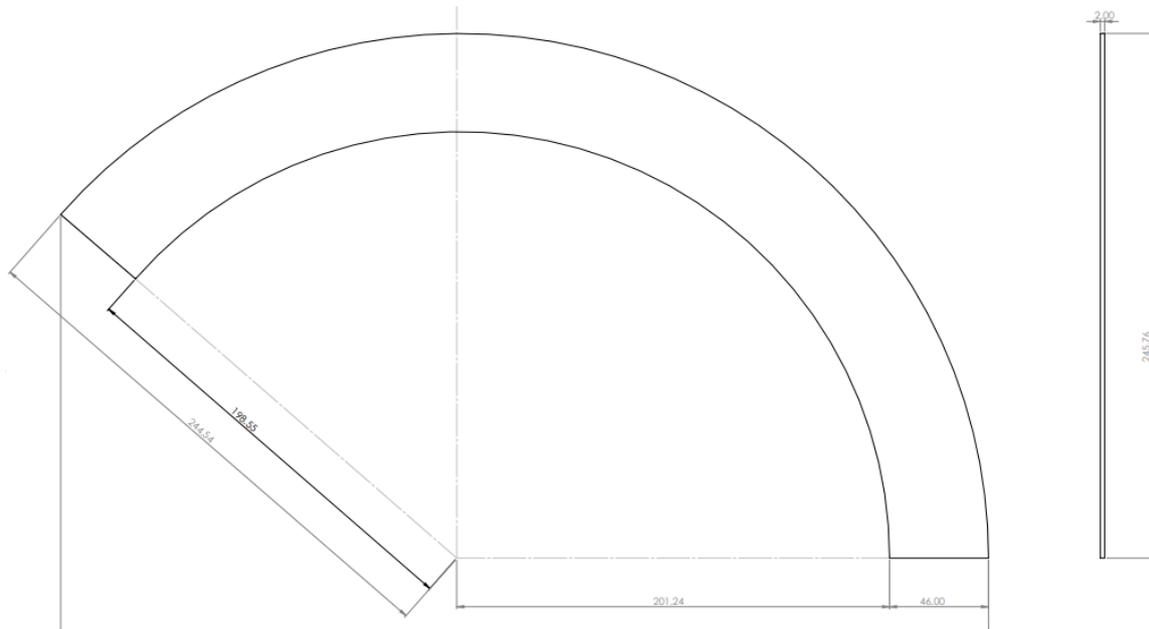
Dengan adanya fitur surface seperti swept dan data desain lebar *blade* (h), maka dapat dibentuk *helicoid* surface, fitur thickening digunakan untuk menebalkan/memberi ketebalan pada surface. Dan modul sheet metal yang menyediakan perintah Loft bend dan flat pattern (flattening) untuk membentangkan bentukan sheet metal 3D yang sudah dibangun, menjadi pelat 2D [16]. Lihat Gambar 7 dan 8.

3. Hasil dan pembahasan

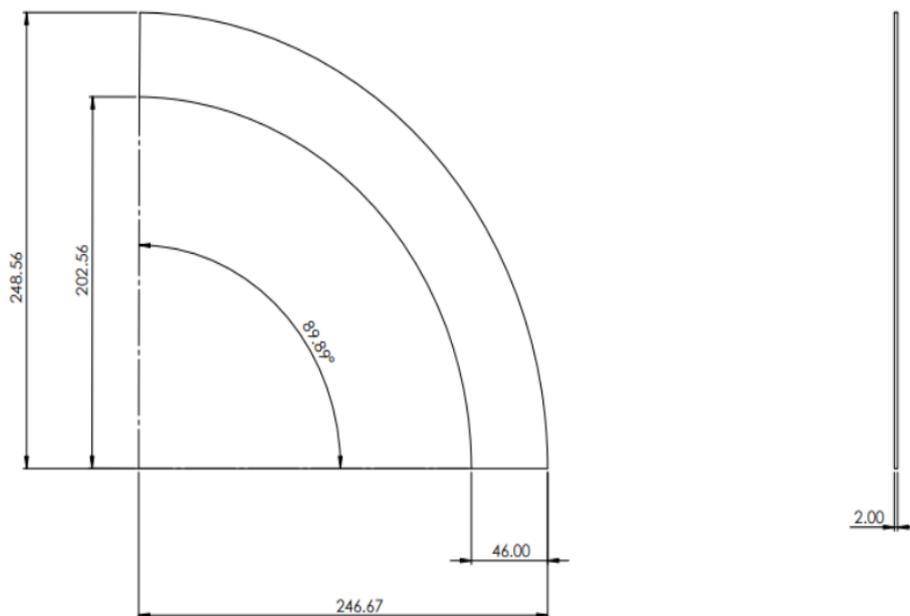
Proses perancangan yang dilakukan menggunakan software CAD solidworks. Penampang tiga dimensi hasil perancangan dapat dilihat pada Gambar 9. Sedangkan hasil penampang 2 dimensi untuk 1 pasang *blade* dengan dimensinya terdapat pada Gambar 10.



Gambar 9. Hasil perancangan *blade* 3 dimensi



(a)



(b)

Gambar 10. Penampang 2 dimensi *blade* drum (a) *Blade* luar arah tangensial maju, (b) *Blade* dalam arah tangensial mundur

Material yang digunakan sebagai *blade* adalah stainlesssteel 304 berbentuk plat setebal 2 mm. Proses pemotongan plat menggunakan *laser cutting*, file CAD *blade* dikonversi dalam bentuk file *iges* yang dapat dikenal oleh mesin *laser cutting*. Hasil pemotongan dapat dilihat pada Gambar 11.

Proses pembentukan plat 2 Dimensi hasil pemotongan menjadi *blade helix* 3 Dimensi dilakukan dengan melakukan penekukan (*bending*) secara simultan di kedua ujung dengan alat bantu tertentu. Pemrosesan harus menghasilkan sudut normal *blade* yang selalu tegak lurus dengan permukaan dalam drum. Hasil pembentukan ini menghasilkan bentuk *blade*

yang baik sesuai dengan metoda pembentukan helix [13] dan dapat dilihat pada Gambar 12, dengan pengecekan berupa alat bantu pipa pada sisi dalam.



Gambar 11. Hasil pemotongan bahan *blade* dengan *laser cutting*



Gambar 12. Hasil pembentukan/*forming blade* menjadi *helix* 3 Dimensi

Jarak *blade* dengan dinding drum ditetapkan lebih besar dari 0 mm sampai dengan 1,5 mm di semua posisi drum. Kerenggangan yang melebihi 1,5 mm dikhawatirkan dapat membuat biji kopi terjepit dan pecah sehingga dapat mempengaruhi proses akhir *peroasting*. Ke dua bagian harus memiliki titik pusat radius dinding drum dan sekaligus poros putar yang sama dengan akurasi tinggi, sehingga dihasilkan posisi yang konsentrik antara sistem *blade* dan dinding drum. Pada skala prototipe penelitian, pengukuran-pengukuran posisi untuk menentukan titik pusat putar tersebut pada bagian tutup, menggunakan *Computer Measurement Machine* CMM agar dihasilkan pengukuran berakurasi tinggi dan proses pengeboran titik-titik tersebut dilakukan dengan menggunakan mesin *Computer Numerical Control* CNC. Proses *assembling blade* yang telah terpasang pada poros drum dapat dilihat pada Gambar 13. Proses *Assembling blade* pada drum dapat dilihat pada Gambar 14.



Gambar 13. *Assembling blade* pada poros drum



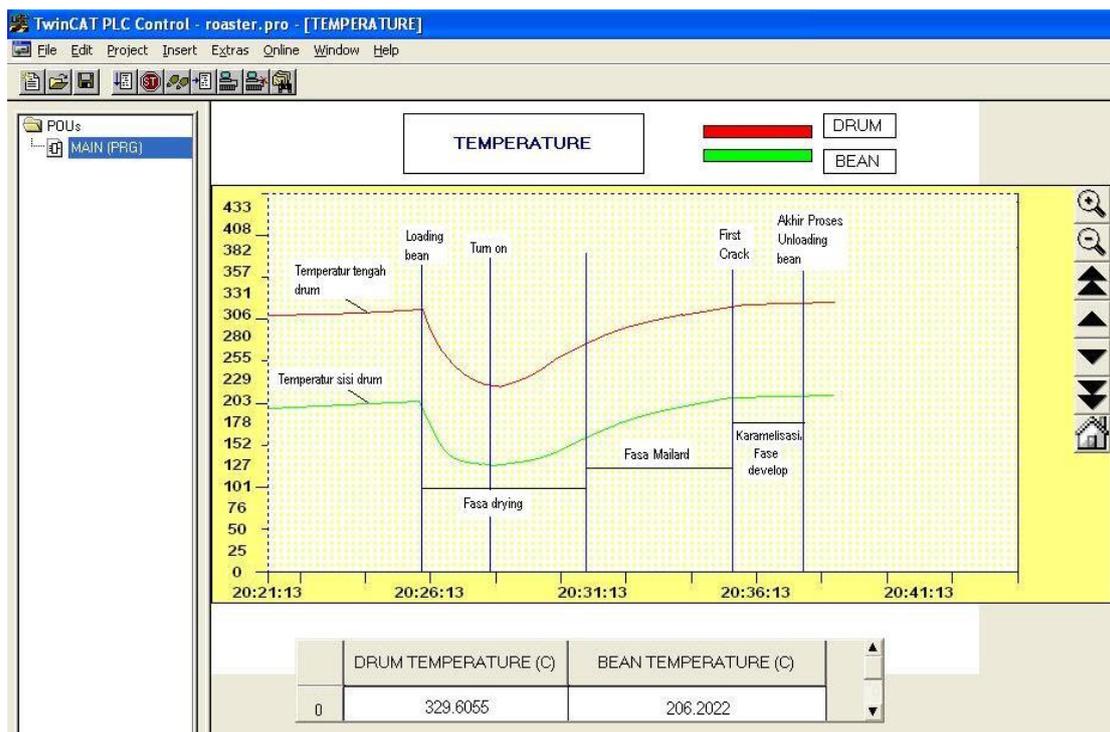
Gambar 14. Posisi *assembling blade* di dalam drum

Pengukuran gap antara dinding dan blade dilakukan menggunakan plat sim berbagai ketebalan dengan perbedaan tebal 0.1 mm untuk setiap posisi ruas blade disampling setiap 45 derajat menunjukkan 75% titik ukur masuk di dalam kriteria terbaik 1 ± 0.5 mm. Gap terbesar adalah 2,4 mm dan terkecil 0.4 mm. *Assembling* sistem mesin *roasting* kopi secara keseluruhan terdapat pada Gambar 15.



Gambar 15. Drum yang telah *terassembling* pada mesin secara keseluruhan

Pengujian awal dilakukan dengan pengamatan temperatur antara bagian tengah dan sisi drum saat melakukan preheating drum sebelum uji coba proses roasting. Pada posisi tersebut ditempatkan sensor temperatur berfungsi mengamati temperatur lingkungan drum dan temperatur bean saat roasting berupa thermocouple tipe K. Pembacaan telah dikalibrasi terhadap digital thermometer Yokogawa di range kerja proses roasting. Hasil pengukuran bersamaan dengan hasil proses roasting terdapat pada gambar 16. Hasil pengukuran menunjukkan temperatur di bagian tengah dengan asumsi sebagai temperatur tertinggi drum adalah 295°C. Temperatur di bagian sisi menunjukkan 195°C. Walaupun tidak dilakukan pengukuran di setiap posisi antara bagian tengah menuju sisi, hasil yang ditunjukkan pada gambar 16 telah menggambarkan perbedaan distribusi temperatur pada drum pada arah radial dari tengah ke sisi serta distribusi temperatur pada biji kopi yang baik berdasarkan pemodelan yang telah dilakukan oleh [9] seperti yang ditunjukkan pada gambar 4b dan Gambar 5. Proses pengujian selanjutnya adalah melakukan proses *roasting greenbean* kopi tanpa melakukan proses *sorting* terhadap ukuran. Ukuran gap terbaik di antara 0,5 mm sampai 1.5 mm diharapkan tidak ada biji kopi yang pecah dikarenakan terhimpit serta tidak terjadi gesekan di antara *blade* dan dinding drum di temperatur kerja. Dari proses roasting yang dilakukan, walaupun terdapat sebaran gap pada permukaan drum di luar gap yang ditetapkan (0.4 mm sampai 2.4 mm) tidak menghasilkan biji yang pecah karena himpitan dan suara gesekan antara drum dengan dinding saat terjadi pemuaian material di temperatur tinggi. Dari hasil *roasting* dengan kematangan medium terlihat biji kopi tidak ada yang pecah secara visual karena terjepit di dalam drum.



Gambar 16. Pengujian temperatur selama proses roasting mulai preheating sampai proses roasting selesai

Secara keseluruhan proses roasting berjalan baik dengan menghasilkan kecepatan proses cukup moderat sesuai target. Total waktu kurang dari 12 menit untuk tingkat kematangan medium dengan first crack di menit ke 9 dan fase develop sekitar 2,5 menit. Hasil uji coba pengeluaran (*unloading*) biji kopi yang telah matang terdapat pada gambar 17 Kecepatan pengosongan (*unloading*) berkisar antara 3 detik sampai 4 detik menunjukkan terjadinya gaya dorong horizontal (tangensial) oleh *blade* yang cukup signifikan.

Gambar 18a saat dilakukan proses pendinginan (*cooling*) terlihat hasil dengan keseragaman warna yang baik dan merata, jika dibandingkan dengan kondisi yang menghasilkan *scorching* dan *tipping* (gambar 18b) serta *overdevelop* (gambar 18c). Hasil *profiling* diharapkan menghasilkan warna fisik yang homogen tanpa menghasilkan efek gosong (*schorching*) dan *tipping*. Tingkat kematanganpun medium sangat homogen dengan kecerahan yang baik. Bila tidak dilakukan proses agitasi yang baik oleh blade, perpindahan panas yang terjadi pada biji kopi tidak akan merata pada arah radial sehingga akan menghasilkan kopi dengan warna yang tidak homogen. Fungsi blade pada penelitian ini berfungsi mengagitasi biji kopi agar secara statistik setiap biji bisa menempati posisi sebarang di dalam drum dengan jumlah proporsi waktu yang sama sehingga hasil roasting dapat homogen.



Gambar 17. Biji kopi saat keluar dari mesin *roasting*



Gambar 18. (a) Kopi hasil uji coba *roasting* dengan warna seragam dan homogen dibandingkan dengan (b) hasil dengan *scorching* dan *tipping* serta (c) hasil *roasting overdevelop*

Tes rasa dilakukan oleh beberapa tester yang memiliki pengalaman dalam melakukan penilaian rasa dan aroma, tetapi tes hanya memberikan penilaian kualitatif umum tanpa mencantumkan kuantitas nilai cupping score. Dari beberapa siklus hasil pengujian didapatkan hasil,

- | | | |
|--|---|---------------------|
| - Keseragaman warna (visual) | : | Sangat Baik |
| - Kekeringan | : | Sangat Baik |
| - Komposisi rasa (bitterness, acidity dan sweetness) | : | Balance (berimbang) |
| - After taste | : | Clean |
| - Karakter spesifik kopi | : | Ada/timbul |
| - Aroma | : | Baik |

4. Kesimpulan

Proses perancangan tangensial drum berhasil dilakukan dengan melakukan proses *reverse engineering* terhadap sebuah hasil rancangan yang telah dipublikasi dan dengan bantuan software CAD dapat menghasilkan geometri dan ukuran yang disesuaikan dengan kebutuhan. Proses pembentukan *single helix blade* dengan proses penekukan (*bending*) menghasilkan bentuk *helicoidal 3D* sesuai dengan spesifikasi yang ditentukan. Proses pembuatan *blade* hasil perancangan dapat menghasilkan gap antara *blade* dan dinding drum sebesar 0,4 mm sampai 2,4 mm secara tanpa menghasilkan biji kopi yang pecah dikarenakan terjepit. Untuk menghasilkan toleransi gap yang lebih akurat dibutuhkan alat bantu mekanik dalam proses pembuatannya, terutama bila prototipe akan dikembangkan ke dalam pembuatan mesin roasting berskala produksi. Konstruksi *blade* pada tangensial drum menghasilkan proses agitasi cukup baik walaupun terjadi distribusi temperatur yang tidak sama pada drum di arah radial. Hal ini ditunjukkan dengan homogenitas warna kopi hasil *roasting* yang uniform. Gaya tangensial dapat dihasilkan cukup signifikan oleh *blade* dalam proses agitasi biji kopi di dalam drum dengan pengamatan pengosongan biji kopi dari drum yang relatif cepat (3 detik - 4 detik).

Daftar Pustaka

- [1] (2019) Royal Coffee, A Guide to Different Heat Types in Roasting Equipment. [online]. Tersedia: <https://perfectdailygrind.com>
- [2] D. D. Hidayat, *et al.* "Development and Evaluation of Drum Coffee Roasting Machine for Small-Scale Enterprises". Research Center for Appropriate Technology. Indonesia Institute of Science, INMATEH Vol. 60. No.1/2020, p.80.
- [3] (2016) The heat is on, A basic guide to better understanding heat transfer on a drum roaster. [online]. Tersedia: <https://www.cafeculture.com>
- [4] (2020) Omden, Conduction vs Convection. [online]. Tersedia: <https://penikmatkopi.id>
- [5] J. P. Holman. "Heat Transfer tenth edition". McGraw-Hill, 2010, p.2 dan p.8.
- [6] (2015) Valerian Hlara, Are Coffee Roast Profiles and Pink Unicorns the Same Thing?. [online]. Tersedia: <https://coffeecourses.com/coffee-roast-profiling/>
- [7] (2016) Michael C. Wright, Heat Transfer Methods Involved in Roasting. [online]. Tersedia: <https://blog.oilslickcoffee.com/2014/02/08/heat-transfer/>
- [8] H. Komossa, S. Wirtz, V. Scherer, F. Herz, E. Specht. 2015, "Heat transfer in indirect heated rotary drums filled with monodisperse spheres: Comparison of experiments with DEM simulations". Powder Technology, volume 286, p.722-731.
- [9] Beatriz Alonso Torres *et al.* "Modelling and Validation of Heat and Mass Transfer in Individual Coffee Beans during the Coffee Roasting Process Using Computational Fluid Dynamics (CFD)", CHIMIA 2013, 67, Nr.4, p.293.
- [10] (2019) Lucy, What is reverse engineering?. [online]. Tersedia: <https://physicaldigital.com/what-is-reverse-engineering/>
- [11] (2013) Focker, New DIY Project: Pseudo-Home-made Drum Roaster. [online]. Tersedia: <https://www.home-barista.com>
- [12] (2020) Samuel Markings. *How to Calculate Helical Length*. [online]. Tersedia: <https://sciencing.com/calculate-helical-length-7808380.html>
- [13] R Duripandi, S Manikandan and S Ganesan. Helicoidal. "Screw Fabrication in Trichy Factory" Eversendai Construction Privated Limited, India, 2016.M, p.3.
- [14] Hirz *et al.* "Integrated Computer-Aided Design in Automotive Development", DOI: 10.1007/978-3-642-11940-8, _ Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, p.52.
- [15] I Scurtu *et al.* "Methods for the Representation of the Helicoidal surface". ResearchGate. May 2017, Volume 12 Issue 12, JIDDEG, p.70.
- [16] L Matt. "Mastering Solidworks". ISBN: 978-1-119-30057-1, _John Wiley & Sons, Inc., Indianapolis, Indiana 2019, p.85.